



Universidad
de Cádiz

Escuela Superior
de Ingeniería

TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

**ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LAS FUERZAS DE
CORTE PRODUCIDAS DURANTE EL
FRESADO HELICOIDAL DE MATERIALES
DE INTERÉS AERONÁUTICO**

AUTOR: ÁLVARO MONTERO GARCÍA

Cádiz, mayo 2021



Universidad
de Cádiz

Escuela Superior
de Ingeniería

TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

**ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LAS FUERZAS DE
CORTE PRODUCIDAS DURANTE EL
FRESADO HELICOIDAL DE MATERIALES
DE INTERÉS AERONÁUTICO**

DIRECTORES: FRANCISCO JAVIER PUERTA MORALES

SEVERO RAÚL FERNÁNDEZ VIDAL

AUTOR: ÁLVARO MONTERO GARCÍA

Cádiz, mayo 2021

Índice

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Campo de aplicación	1
1.4. Fases y metodología	2
2. Marco de referencia	3
2.1. Marco histórico	3
2.2. Mecanizado	5
2.2.1. Taladrado Convencional	5
2.2.2. Fresado	11
2.2.3. Fresado Helicoidal	22
2.3. Calidad agujero	38
2.3.1. Diámetro	38
2.3.2. Rugosidad	39
2.3.3. Rebaba	40
2.4. Materiales Utilizados	40
2.4.1. Fibra de Carbono	40
2.4.2. Aleaciones de Titanio	42
3. Metodología	45
3.1. Planificación del ensayo	45
3.2. Herramienta	45
3.3. Estudio estadístico	47
3.3.1. Titanio UNS R56400	48
3.3.2. CFRP	49
3.4. Elección parámetros de corte	49
3.4.1. Parámetros Titanio (UNS R56400)	49
3.4.2. Parámetros CFRP	51
3.5. Preparación de ensayos	55
3.6. Realización de ensayos	57
3.6.1. Sujeción probetas Titanio (UNS R56400)	57
3.6.2. Sujeción probetas CFRP	58
3.7. Obtención de las fuerzas	59
3.8. Procesamiento de datos	60
4. Resultados	67
4.1. CFRP	67
4.1.1. Resultados CFRP	67
4.1.2. Conclusiones CFRP	82
4.2. Titanio (UNS R56400)	82
4.2.1. Resultados Titanio (UNS R56400)	82
4.2.2. Conclusiones Titanio (UNS R56400)	104
5. Conclusión	105
Bibliografía	106

A. Resultado de fuerzas en los ensayos de CFRP	113
A.1. 1_HM_CFRP_75_30_3_C	113
A.2. 2_HM_CFRP_150_30_6_O	116
A.3. 3_HM_CFRP_75_60_3_O	119
A.4. 4_HM_CFRP_150_60_3_C	122
A.5. 5_HM_CFRP_75_30_6_O	125
A.6. 6_HM_CFRP_150_30_6_C	127
A.7. 7_HM_CFRP_75_60_6_C	130
A.8. 8_HM_CFRP_150_60_6_O	133
A.9. 9_HM_CFRP_112.5_45_4.5_C	136
A.10.10_HM_CFRP_112.5_45_4.5_O	139
B. Resultado de fuerzas en los ensayos de titanio	142
B.1. Fase 1	142
B.1.1. 1_HM_Ti_80_15_0.5_C	142
B.1.2. 2_HM_Ti_160_15_1_O	145
B.1.3. 3_HM_Ti_80_30_0.5_O	148
B.1.4. 4_HM_Ti_160_30_0.5_C	151
B.1.5. 5_HM_Ti_80_15_1_O	153
B.1.6. 6_HM_Ti_160_15_1_C	156
B.1.7. 7_HM_Ti_80_30_1_C	158
B.1.8. 8_HM_Ti_160_30_1_O	161
B.1.9. 9_HM_Ti_120_22.5_0.75_C	164
B.1.10.10_HM_Ti_120_22.5_0.75_O	167
B.2. Fase 2	170
B.2.1. Repetición 6_HM_Ti_160_15_1_C	170
B.2.2. 2_HM_Ti_160_15_1_C	172
B.2.3. 3_HM_Ti_80_30_0.5_C	175
B.2.4. 5_HM_Ti_80_15_1_C	178
B.2.5. 8_HM_Ti_160_30_1_C	181
B.3. Ensayo Vida	184
B.3.1. 5_Vida_HM_Ti_80_15_1_C	184
C. Especificaciones de la herramienta	210

Índice de figuras

1.	Artículos sobre el fresado helicoidal recogido en los últimos años en Web of Science [1]	3
2.	Berbiquí: sin fuerza motriz.	6
3.	Eléctrico sin cable.	6
4.	Husillos múltiples [2]	7
5.	Partes de la herramienta de taladrado [3].	8
6.	Principales parámetros del taladrado [3].	9
7.	Descripción gráfica de los parámetros del taladrado [3].	10
8.	Partes de una fresadora [4].	13
9.	Tipos especiales de máquinas fresadoras de rodilla y columna [5]	13
10.	Fresadoras verticales [6].	14
11.	Fresadoras horizontales [6].	14
12.	Fresadora CNC de 5 ejes [7].	14
13.	Tipos de fresas [8].	15
14.	Partes de una herramienta para fresado [9].	16
15.	Filos zona cortante herramienta fresado [10].	17
16.	Parámetros de corte [10].	19
17.	Profundidad de la pasada axial y radial [10].	20
18.	Fresado en oposición (up milling) [11].	21
19.	Fresado en concordancia (down milling) [11].	22
20.	Proceso fresado helicoidal [12]	22
21.	Herramienta para el fresado helicoidal.	24
22.	Herramienta fresa helicoidal y una ampliación de las plaquitas [13]	24
23.	Descomposición trayectoria helicoidal.	27
24.	Parámetros de corte fresado helicoidal [14,15]	29
25.	Tipos de viruta [16]	30
26.	Fresado en oposición (up milling) [11].	31
27.	Fresado en concordancia (down milling) [11].	32
28.	Corte ortogonal y corte oblicuo [16].	32
29.	Parámetros geométricos y diferentes ángulos dentro del corte [16].	33
30.	Ángulos de posición [10]	33
31.	Ángulos de desprendimiento axial y radial [10]	33
32.	Ángulos de espesor de la viruta [10]	34
33.	Fuerzas fresado helicoidal [17,18]	36
34.	Distribución fuerza axial en la salida de una probeta de CFRP [19]	37
35.	Comparación de las fuerzas medidas y simuladas [20].	37
36.	Micrómetro de interiores	39
37.	Superficie y línea media [21]	40
38.	Segmentación de viruta en la aleación [22]	44
39.	Diagrama para la propuesta metodológica.	45
40.	Catálogo herramienta Kendu 6302 [23]	46
41.	Diseños factoriales disponibles en Minitab [24]	48
42.	Velocidad de corte CFRP, 1 [25], 2 [26], 3 [17], 4 [27], 5 [28], 6 [29], 8 [30], 9 [31], 10 [32], 11 [33], 12 [19]	52
43.	Avance tangencial CFRP, 1 [25], 2 [26], 3 [17], 4 [27], 5 [28], 6 [29], 8 [30], 9 [31], 10 [32], 11 [33], 12 [19]	53
44.	Avance axial CFRP, 1 [25], 2 [26], 3 [17], 4 [27], 5 [28], 6 [29], 8 [30], 9 [31], 10 [32], 11 [33], 12 [19]	54
45.	Kondia Five 400.	55
46.	Controlador iTNC 530.	56
47.	Lenguaje de programación.	57
48.	Sujeción de la probeta de Titanio.	58
49.	Sujeción de la probeta de CFRP.	58
50.	Sujeción de la probeta de CFRP modelada en CATIA.	59
51.	Mesa dinamométrica Kistler modelo 9255C.	59
52.	Amplificador Kistler modelo 5070A.	60
53.	Datos importados en OriginPro.	61

54.	Gráfica señal D(Y), eje Z.	61
55.	Representación de la dispersión de los valores.	62
56.	Señal con el filtro aplicado.	62
57.	Señal con la corrección de la deriva.	63
58.	Señal original con la corrección de la deriva.	63
59.	Envolvente superior.	64
60.	Datos de fuerzas separados en PreMecanizado, Mecanizado, PostMecanizado. . . .	65
61.	Gráficas representación fuerza.	66
62.	Gráfica tabla de datos 1_HM_CFRP_75_30_3_C	67
63.	Gráfica 1_1HM_CFRP_75_30_3_C	68
64.	Gráfica tabla de datos 2_HM_CFRP_150_30_3_O	68
65.	Gráfica 2_1HM_CFRP_150_30_3_O	69
66.	Gráfica tabla de datos 3_HM_CFRP_75_60_3_O	69
67.	Gráfica 3_1HM_CFRP_75_60_3_O	70
68.	Gráfica 3_1HM_CFRP_75_60_3_O, premecanizado y mecanizado, sin postme- canizado	70
69.	Gráfica tabla de datos 4_HM_CFRP_150_60_3_C	71
70.	Gráfica 4_1HM_CFRP_150_60_3_C	71
71.	Gráfica 5_1HM_CFRP_75_30_6_O	72
72.	Gráfica tabla de datos 6_HM_CFRP_150_30_6_C	72
73.	Gráfica 6_1HM_CFRP_150_30_6_C	73
74.	Gráfica tabla de datos 7_HM_CFRP_75_60_6_C	73
75.	Gráfica 7_1HM_CFRP_75_60_6_C	74
76.	Gráfica tabla de datos 8_HM_CFRP_150_60_6_O	74
77.	Gráfica 8_1HM_CFRP_150_60_6_C	75
78.	Gráfica tabla de datos 10_HM_CFRP_112.5_45_4.5_C	75
79.	Gráfica 9_1HM_CFRP_150_60_6_C	76
80.	Gráfica tabla de datos 10_HM_CFRP_112.5_45_4.5_O	76
81.	Gráfica 10_1HM_CFRP_112.5_45_4.5_O	77
82.	Evolución de la media a lo largo de los mecanizados y con las distintas corridas CFRP. 77	
83.	Evolución de la media de la envolvente a lo largo de los mecanizados y con las distintas corridas CFRP.	78
84.	Representación gráfica 2_1HM_CFRP_150_30_3_O sin error.	79
85.	Representación diagramas de Pareto.	80
86.	Diagrama de Pareto, corrida 10 con $\alpha = 0,2$	81
87.	Efectos principales corrida 1	81
88.	Efectos principales corrida 10	82
89.	Gráfica tabla de datos 1_HM_Ti_80_15_0.5_C	83
90.	Gráfica 1_1HM_Ti_80_15_0.5_C	83
91.	Gráfica tabla de datos 2_HM_Ti_160_15_0.5_O	84
92.	Gráfica 2_1HM_Ti_160_15_0.5_O	84
93.	Gráfica tabla de datos 3_HM_Ti_80_30_0.5_O	85
94.	Gráfica 3_1HM_Ti_80_30_0.5_O	85
95.	Gráfica 4_1HM_Ti_160_30_0.5_O	86
96.	Gráfica tabla de datos 5_HM_Ti_80_15_1_O	86
97.	Gráfica 5_1HM_Ti_80_15_1_O	87
98.	Gráficas 6_HM_Ti_160_15_1_C.	88
99.	Gráfica tabla de datos 7_HM_Ti_80_30_1_C	89
100.	Gráfica tabla de datos 8_HM_Ti_160_30_1_C	89
101.	Gráfica 8_2HM_Ti_160_30_1_O	90
102.	Gráfica tabla de datos 9_HM_Ti_120_22.5_0.75_C	90
103.	Gráficas 9_HM_Ti_120_22.5_0.75_C.	91
104.	Gráfica tabla de datos 10_HM_Ti_120_22.5_0.75_C	92
105.	Gráficas 10_HM_Ti_120_22.5_0.75_O.	93
106.	Evolución de la media a lo largo de los fresados y con las distintos agujeros en titanio. 94	
107.	Gráfica tabla de datos 2_HM_Ti_160_15_0.5_C	95
108.	Gráfica tabla de datos 3_HM_Ti_80_30_0.5_C	95
109.	Gráfica tabla de datos 5_HM_Ti_80_15_1_C	96

110. Gráficas fase 1 y 3, 5_3HM_Ti_80_15_1_C y 5_3HM_Ti_80_15_1_O.	97
111. Gráfica tabla de datos 8_HM_Ti_160_30_1_C	98
112. Comparación fase 1 y 2 media.	98
113. Comparación fase 1 y 2 envolvente.	99
114. Evolución media y media de la envolvente, ensayo de vida Titanio	101
115. Evolución R_a y F_z media, ensayo de vida Titanio	102
116. Gráficas vida 5_HM_Ti_80_15_1_C.	103

Índice de tablas

1.	Calidad artículos estudiados, 1 [34], 2 [35], 3 [36], 4 [37], 5 [38], 6 [39].	38
2.	Fuerzas artículos estudiados, 1 [34], 2 [35], 3 [36], 4 [37], 5 [38], 6 [39].	38
3.	Composición Ti6Al4V [40]	43
4.	Propiedades Ti6Al4V [40]	44
5.	Diámetros	47
6.	Nomenclatura primera corrida Titanio, se repite 2 veces más	48
7.	Nomenclatura primera corrida CFRP, se repite 9 veces más	49
8.	Parámetros fabricante V_c (m/min) para Titanio (UNS R56400)	49
9.	Parámetros V_c para Titanio (UNS R56400)	49
10.	Parámetros intermedios V_c para Titanio (UNS R56400)	50
11.	Parámetros fabricante f_{zt} (mm/z) para Titanio (UNS R56400)	50
12.	Parámetros f_t para Titanio (UNS R56400)	50
13.	Parámetros intermedios f_t para Titanio (UNS R56400)	50
14.	Parámetros fabricante f_{za} (mm/z) para Titanio (UNS R56400)	50
15.	Parámetros f_a para Titanio (UNS R56400)	51
16.	Parámetros intermedios f_a para Titanio (UNS R56400)	51
17.	Parámetros V_c para CFRP	52
18.	Parámetros V_c para CFRP	52
19.	Parámetros f_t para CFRP	53
20.	Parámetros f_t para CFRP	53
21.	Parámetros f_a para CFRP	54
22.	Parámetros f_a para CFRP	54
23.	Tiempos mecanizado.	64
24.	1_HM_CFRP_75_30_3_C	67
25.	2_HM_CFRP_150_30_3_O	68
26.	3_HM_CFRP_75_60_3_O	69
27.	4_HM_CFRP_150_60_3_C	70
28.	5_1HM_CFRP_75_30_6_O	71
29.	6_HM_CFRP_150_30_6_C	72
30.	7_HM_CFRP_75_60_6_C	73
31.	8_HM_CFRP_150_60_6_O	74
32.	9_HM_CFRP_112.5_45_4.5_C	75
33.	10_HM_CFRP_112.5_45_4.5_C	76
34.	Error ensayos en oposición	79
35.	1_HM_Ti_80_15_0.5_C	83
36.	2_HM_Ti_160_15_0.5_O	84
37.	3_HM_Ti_80_30_0.5_O	84
38.	4_HM_Ti_160_30_0.5_C	85
39.	5_HM_Ti_80_15_1_O	86
40.	6_HM_Ti_160_15_1_C	87
41.	7_HM_Ti_80_30_1_C	88
42.	8_HM_Ti_160_30_1_O	89
43.	9_HM_Ti_120_22.5_0.75_C	90
44.	10_HM_Ti_120_22.5_0.75_O	91
45.	6_HM_Ti_160_15_1_C	94
46.	2_HM_Ti_160_15_0.5_C	94
47.	3_HM_Ti_80_30_0.5_C	95
48.	5_HM_Ti_80_15_1_C	96
49.	8_HM_Ti_160_30_1_C	97
50.	Ensayo de vida herramienta	100

Lista de símbolos

V_c	Velocidad de corte (m/min)	D	Diámetro de la broca (mm)
π	Número PI (adimensional)	N	Velocidad de rotación de la herramienta (rpm)
f_n	Avance por revolución (mm/rev)	V_f	Velocidad de avance (mm/min)
f_z	Avance (mm/rev)	a_c	Espesor del corte (mm)
a_w	Anchura de la viruta (mm)	S_c	Sección de la viruta (mm^2)
z	Número de filos (adimensional)	K_r	Ángulo de posición ($^\circ$)
P_c	Potencia de corte (W)	F_c	Fuerza de corte (N)
p_s	Energía específica de corte (W/kg)	f_t	Avance tangencial (mm/rev)
f_{zt}	Avance tangencial por diente (mm/z)	V_{ft}	Velocidad de avance tangencial (mm/min)
f_a	Avance axial (mm/rev)	f_{za}	Avance axial por diente (mm/z)
V_{fa}	Velocidad avance axial (mm/min)	V_t	Velocidad tangencial (mm/min)
D_h	Diámetro hélice (mm)	D_b	Diámetro del agujero (mm)
D_t	Diámetro de la herramienta (mm)	a_e	Profundidad de pasada radial (mm)
a_p	Profundidad de pasada axial (mm)	α	Ángulo de la hélice ($^\circ$)
γ	Ángulo de desprendimiento ($^\circ$)	δ	Ángulo de incidencia ($^\circ$)
β	Ángulo de filo ($^\circ$)	φ	Ángulo de deslizamiento ($^\circ$)
a_c	Espesor de viruta deformada (mm)		

1. Introducción

1.1. Motivación

La industria aeroespacial tiene una gran importancia en el sector económico mundial y se sitúa a la vanguardia en el desarrollo de tecnología. En España se estiman 108.00 empleos directos e indirectos de esta industria, con una actividad económica de 8.947 millones de euros. De esta actividad económica se destinan 936 millones de euros al I+D+i en el año 2017 [41].

Dentro de la industria aeroespacial hay que destacar 5 grandes pilares : formación, I+D+i, cadena de suministro, medioambiente y competitividad. En España se invierte mucho tiempo y esfuerzo al I+D+i ya que es lo que nos permite aumentar la producción y ser más competitivos. Como consecuencia de esto, empiezan a aparecer nuevas técnicas de producción para realizar procesos convencionales de manera más eficiente.

El fresado helicoidal, es una técnica de mecanizado que lleva coexistiendo con el taladrado convencional mucho tiempo. Esta técnica consiste en realizar un taladrado describiendo una trayectoria helicoidal. En los últimos años el fresado helicoidal esta cobrando una gran importancia debido a los numerosos beneficios encontrados. Como veremos más adelante cualquier pequeña mejora obtenida en estos procesos puede suponer un gran ahorro de tiempo y como consecuencia de costes.

1.2. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo el estudio de las fuerzas generadas durante el fresado helicoidal en fibra de carbono y titanio, y de como estas fuerzas influyen en los indicadores de calidad y el desgaste de la herramienta. En el trabajo, se desarrolla una metodología para la obtención de valores clave a partir de las señales de fuerza, permitiendo la obtención de los resultados. Se añadirán también los parámetros utilizados para el mecanizado de la fibra de carbono y Titanio.

La aplicación de la metodología tiene como objetivo la correlación de estos parámetros clave con los valores de calidad admisibles, permitiendo identificar de una forma on-line, como se esta llevando a cabo el proceso de mecanizado. El seguimiento on-line es importante debido a que nos conduce a la nueva filosofía de industria, una industria más automatizada y eficiente.

El objetivo final es la detección de cuando un agujero esta fuera de las tolerancias exigidas en la industria de una manera on-line, sin necesidad de medir, consiguiendo de esta manera cero defectos.

1.3. Campo de aplicación

El campo de aplicación se encuentra en toda la industria dedicada a la realización de taladros, pero en especial la industria aeroespacial la cual ha aumentado su interés en este tipo de técnica de mecanizado debido a los grandes requisitos de calidad que se necesitan, tolerancias muy ajustadas y requerimientos muy específicos.

El fresado helicoidal es una gran oportunidad para la industria para conseguir algunos de los objetivos propuestos dentro de Clean Sky (Proyecto dentro de la UE), más concretamente en Airframe ITD en el cual se comenta la aparición de nuevas técnicas de mecanizado que nos permitan el mecanizado de nuevos materiales como la fibra de carbono y compuestos novedosos. Otro de los objetivos que se puede alcanzar con esta nueva técnica es el ahorro de costes en el proceso de fabricación debido a la mejor optimización del tiempo [42]. Los materiales que utilizaremos en este estudio son:

- CFRP s/ AIMS05-27-002 y GFRP s/ AIMS05-02-006
- UNS R56400 (Ti6Al4V)

Otros objetivos a alcanzar son el one way assembly agujeros en la posición de ensamblaje [43] y el one-shoot drilling agujeros en una única pasada [44]. Con estas técnicas, se consigue un gran ahorro de tiempo en los procesos finales, asegurando el ajuste de sus componentes y llevando una reducción de costes.

1.4. Fases y metodología

El trabajo consta de 3 apartados bien identificadas. Una primera parte de introducción donde se hablará de la situación histórica acompañado de un breve estado del arte sobre el fresado helicoidal y los materiales utilizados. Una segunda parte donde se desarrollara toda la metodología y el tratamiento de los datos y una última parte donde se procederá al análisis de los datos obtenidos y se obtendrán las conclusiones finales. A modo de resumen:

- Apartado 1 : Contexto histórico y estado del arte.
- Apartado 2 : Obtención de los datos y procesamiento de los mismos.
- Apartado 3 : Análisis de los datos obtenidos y conclusiones.

2. Marco de referencia

2.1. Marco histórico

La industria es la actividad que mediante la acción humana y las máquinas especializadas es capaz de obtener productos elaborados o semielaborados a gran escala. Existen multitud de industrias, industria automovilística, la industria mecánica, la industria energética [45, 46]...

Una de la industria más importantes y en la cual se va a centrar más el trabajo es la industria aeroespacial, debido a multitud de factores. Es una industria donde la competitividad es muy elevada, en la cual es importante ahorrar coste para aumentar los beneficios. Para ahorrar costes existen diversos factores uno de lo más importantes es la reducción de peso de la aeronave. Para conseguir este objetivo existe una búsqueda continua de nuevos materiales.

En la industria aeroespacial existen diferentes tipos de aeronaves: Pasajeros, transporte, carga, ultraligeros... Dependiendo de las funciones para las que se han construido. En una aeronave pequeña se tienen del entorno a los 85000 remaches por aeronave [44] y en una aeronave comercial como puede ser un Boeing 747, únicamente en sus alas tenemos 80000 remaches [47] y en toda la aeronave entorno a 1 millón / 1.5 millones de remaches. El número de remaches es un símil del número de taladrados que se necesita dentro de una aeronave.

Como se puede observar la importancia del taladrado cobra una gran importancia en la industria aeroespacial debido a que el remachado es el proceso de unión más abundante en las aeronaves. Otros procesos de unión como puede ser la soldadura no son avionables debido a los grandes esfuerzos a fatiga que soporta la aeronave. Otro proceso que también se está empezando a utilizar es la adhesión pero se acompaña por el momento de remaches para aumentar la seguridad entre los elementos a unir.

La industria aeroespacial es una de las industrias más importantes a nivel mundial, es por eso que siempre intentan estar a la vanguardia de las nuevas tecnologías y nuevos materiales con mejores prestaciones que los actuales. Los procesos de mecanizado de estos nuevos materiales resultan muy complejos. Es por eso que aparecen nuevas técnicas de mecanizado como puede ser el fresado helicoidal que está ganando popularidad en los últimos años, como queda reflejado en el Gráfico 1 en el cual se puede ver el aumento de artículos que tratan sobre el fresado helicoidal en los últimos años.

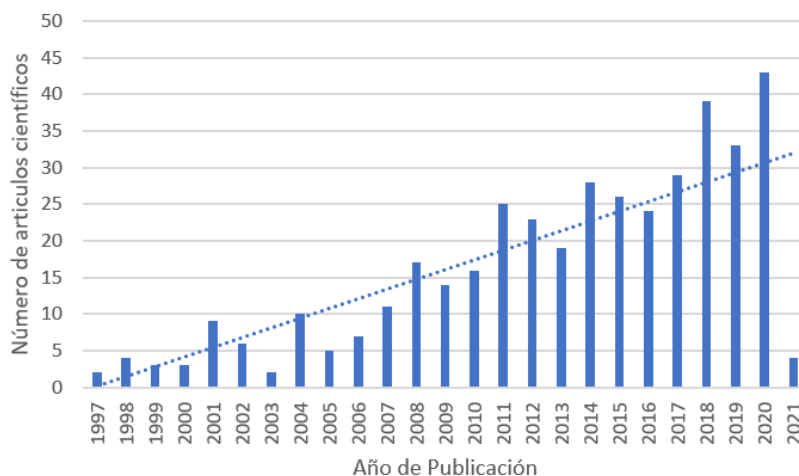


Figura 1: Artículos sobre el fresado helicoidal recogido en los últimos años en Web of Science [1]

Otro aspecto muy importante para la industria aeroespacial es la calidad de los agujeros obtenidos. La calidad final de los agujeros obtenidos en el mecanizado requiere unas altas exigencias debido a la importancia de los componentes. Debido a la evolución de los materiales cada vez resulta más complicado mecanizarlos, el taladrado convencional no es tan eficiente, en muchos

casos requiere de diferentes etapas para lograr la calidad exigida, incluso de retrabajos como la eliminación manual de rebabas, es por eso que el fresado helicoidal gana una gran importancia por los resultados obtenidos en el mecanizados de estos materiales.

Una posible alternativa para poder seguir utilizando el taladrado convencional es el uso de lubricación. Mediante la lubricación se obtiene un mejor proceso de refrigeración por lo cual se reducen las altas temperaturas que afectan significativamente a la calidad [48]. El problema del uso de lubricantes es el impacto medioambiental, el impacto sobre la salud de los operarios y el coste derivado a la posterior limpieza del mecanizado. Por lo cual el uso de lubricante implica un aumento del coste y tiempo por la realización de cada mecanizado. Pero el mayor inconveniente es el impacto medioambiental ya que el objetivo de Clean Sky se obtiene eliminando procesos que contaminen y tengan un impacto con el medio ambiente para que la industria sea mas sostenible, por lo cual la tendencia es a no utilizar lubricación, es decir el mecanizado en seco donde el fresado helicoidal destaca [42].

Además aparecen dos nuevas formas de trabajar, buscando aumentar la eficiencia y asegurar la calidad, aumentar la productividad de los procesos de montaje por remaches es una necesidad de la industria aeronáutica, y el One Way Assembly (OWA) es una respuesta a esa necesidad. El OWA consiste en taladrar los componentes estructurales en su posición de montaje final, para colocar seguidamente el remache, eliminando las etapas de separación de los componentes estructurales para proceder a limpiar de virutas las intercaras, eliminar rebabas y verificar la calidad del agujero. Además de la operación en One Shot Drilling (OSD), se elimina la necesidad de rebarbar y limpiar, por lo que no habría que separar las piezas una vez taladradas. Esto implica que las operaciones de galgeo y aplicación de sellante, si fueran necesarias, habría que realizarlas antes de taladrar. Por lo tanto no permite el uso de lubricación, o solo en cantidades mínimas, y el agujero no puede presentar ningún daño en forma de rebaba o pequeñas delaminaciones.

Se habla de taladro definitivo cuando se consiguen la dimensión y calidad requeridas en una operación. Esto también se conoce como One Shot Drilling (OSD). Se utiliza únicamente una herramienta y se consiguen las dimensiones y calidad superficial en una única operación. Esto tiene importantes beneficios como el aumento de la cadencia y la reducción de costes de herramienta. Está muy extendido en la industria para el taladrado de materiales compuestos y aleaciones metálicas. Sin embargo, debido a su complejidad, no se realiza en apilados híbridos ni en diámetros grandes. En los apilados híbridos, como se están mecanizando diferentes materiales ya que se deben de optimizar los parámetros con los cuales mecanizamos, ya que cada material requiere de unos parámetros de mecanizado diferentes, una vez optimizados estos parámetros para cada material se conseguirá obtener agujeros con la calidad necesaria dentro de la industria aeroespacial en una única pasada ahorrando tiempo y dinero. Estas dos nuevas técnicas vienen adaptándose a la evolución de la industria en la cual se pretenden optimizar todos los procesos para ser mas eficientes [43, 44].

2.2. Mecanizado

2.2.1. Taladrado Convencional

2.2.1.1 Definición

El taladrado es un término que cubre todos los métodos para producir agujeros cilíndricos en una pieza con herramientas de arranque de viruta. Además del taladrado de agujeros cortos y largos, el término también cubre el mecanizado posterior como el brochado, escariado, mandrinado y varias formas de acabado como bruñido con rodillos [49].

La operación del taladrado se usa principalmente para realizar orificios en una pieza, a este fin llegamos mediante diferentes procesos como: el avellanado cuya misión es preparar el alojamiento de tornillos y arandelas en la pieza a taladrar. El mandrinado que solamente se utiliza para agrandar orificios ya existentes.

La broca que es una herramienta cilíndrica rotatoria con bordes cortantes, de diferentes calibres, que permiten desarrollar el orificio gracias al giro de la misma y al avance longitudinal que realiza la herramienta sobre la pieza que estamos perforando, por norma general, es la broca la que avanza dentro de la pieza de trabajo permaneciendo ésta estacionaria, para formar un agujero cuyo diámetro está determinado por el diámetro de la broca. Reseñar la importancia de la dureza de la broca, como ejemplo diremos que en los trabajos sobre metales la dureza llega a ser de 60 HRc. el escariado, herramienta de varios filos que se utiliza para dar un buen acabado superficial de los taladros.

La importancia del taladrado está vinculado con el mal funcionamiento en los componentes, representando según estudios en el 60 % de las piezas defectuosas que ocasionan la revisión de las piezas taladradas [5, 50–53]

2.2.1.2 Máquina

En 1838, Nasmyth construye un taladro de sobremesa totalmente metálico, Joseph Whitworth, construyó en 1850 un taladro de columna [54].

El proceso de evolución desde su aparición en el mundo industrial ha sido continuo, pasando de procesos manuales o semimanuales a procesos completamente automatizados. Lo que lo convierte en un proceso cinemáticamente más sencillo, siendo una gran ventaja. La fabricación aeronáutica cada día busca más la automatización de procesos que conducen a un menor coste de los procesos, gracias a la mecanización de los mismos, al tiempo que obtiene trabajos de más calidad [55].

Es aconsejable la utilización de un soporte vertical o un taladro de columna. Las revoluciones del taladro deben ser menores cuanto mayor sea el diámetro de la broca y cuanto mayor sea la dureza del material a trabajar.

Cuando taladramos se pretende agrandar el agujero, cortar la rosca interior, hacer el agujero escalonado, abocardar o central el agujero inicial, a estos procesos los denominamos, escariado, roscado interno, abocardado, avellanado o centrado respectivamente.

Los tipos de taladros podemos clasificarlos según su tipo de energía, su mecanismo de funcionamiento y tamaño [56].

- Tipo de Energía:
 - Sin fuerza motriz. (Barrena, Taladrado de mano, Taladrado de pecho, Berbiquí²)



Figura 2: Berbiquí: sin fuerza motriz.

- Eléctricos.
- Neumáticos.
- Con motor de combustión interna.
- Tipo de mecanismo de funcionamiento:
 - Manuales.
 - Eléctricos con cable.
 - Eléctricos sin cable.



Figura 3: Eléctrico sin cable.

- Percutores.
- De columna/verticales.
- Radiales.
- Husillos múltiples.



Figura 4: Husillos múltiples [2]

- En fila.
- De torreta.
- CNC.
- Tipo según tamaño:
 - Portátiles.
 - Estacionarios.
 - De banco.
 - De piso.
 - Industriales.

2.2.1.3 Herramienta

La herramienta utilizada en el taladrado son las brocas. La broca se trata de una pieza metálica de corte con la cual se realizan agujeros cilíndricos en diversas superficies [57] .

La broca es una barra de acero templado, de tal forma afilada por un extremo, que al girar pueda penetrar en un cuerpo y cortar pequeñas porciones llamadas virutas. Las brocas más generalizadas son las llamadas helicoidales. Las demás pueden considerarse brocas especiales [2] .

Existe una gran variedad de brocas en tamaño y diseño de helicoides de corte, según el uso específico que deba darse. Y según el tamaño y el material sobre el que actúan, las hay: larga, superlarga, de centrar, de paleta, de taladro profundo o escopeta, para excavación, helicoidal, para máquinas de control numérico, para berbiquí, de tres puntas, tipo C o cónicas, forstner, para router o tupi, laminada con plaquita de tungsteno, resada con plaquita de carburo de alto rendimiento, HHS laminada, HHS rectificada, HHS titanio rectificada, HHS cobalto rectificada, escalonada, diamantada, macho rosca, extensibles, , Con vástago SDS plus y SDS quick [58].

Las herramientas utilizadas en el taladrado se denominan brocas.

2.2.1.4 Geometría

En las brocas podemos diferenciar dos partes: el mango y el cuerpo o parte cortante, la parte cortante esta compuesta de filo principal, secundario y transversal, superficie de incidencia, y de

desprendimiento, ver la Figura 5.

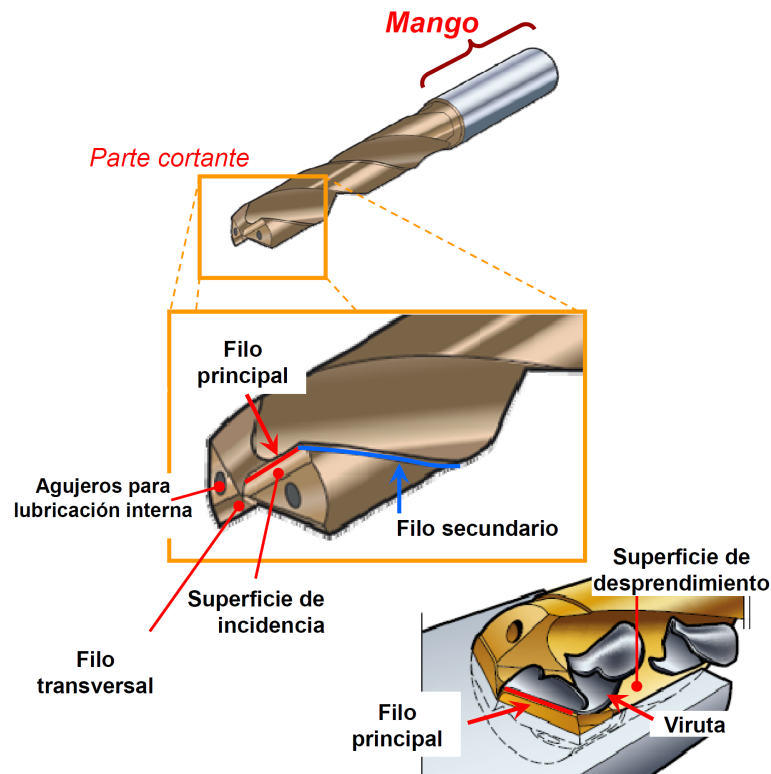


Figura 5: Partes de la herramienta de taladrado [3].

Los ángulos de corte determinan la forma de entrada de la herramienta en la pieza que se esta mecanizando, siendo los parámetros básicos:

- V_c : Velocidad de Corte (m/min) en la que influye el diámetro de la broca y la velocidad de rotación.
- V_f : Velocidad de Avance (mm/min).
- F_z : Avance por filo (mm/diente) en la que influye el Avance, la velocidad de Avance, el número de filos de la broca y la velocidad de rotación de la misma.

En la Figura 6 se muestran los parámetros básicos previamente descritos.

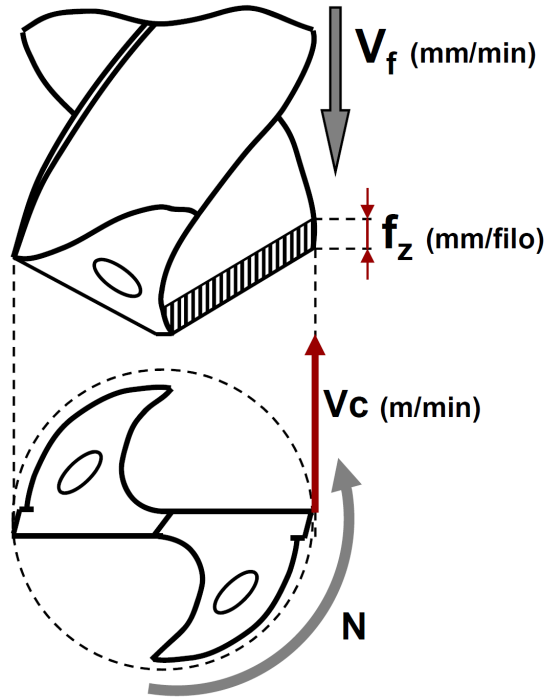


Figura 6: Principales parámetros del taladrado [3].

También en la operación de taladrado debemos de tener en cuenta la fuerza y potencia de corte, así como la sección de viruta provocada.

- Espesor de Corte a_c (mm), en el que influye el avance por filo (f_z) y el ángulo de posición (K_r).
- La anchura de viruta a_w (mm), en la que influye el diámetro de la broca (D) y el ángulo de posición (K_r).
- Sección de viruta S_c (mm²), en la que influye el espesor de corte (a_c) y la anchura de viruta (a_w).
- Fuerza de corte F_c (N), en la que influye la energía específica de corte (p_s) y la sección de viruta (S_c).
- Potencia de corte P_c (W), en la que influye el número de filos (z), la fuerza de corte (F_c) y la velocidad de corte (V_c).

En la Figura 7 se muestran los parámetros descritos previamente.

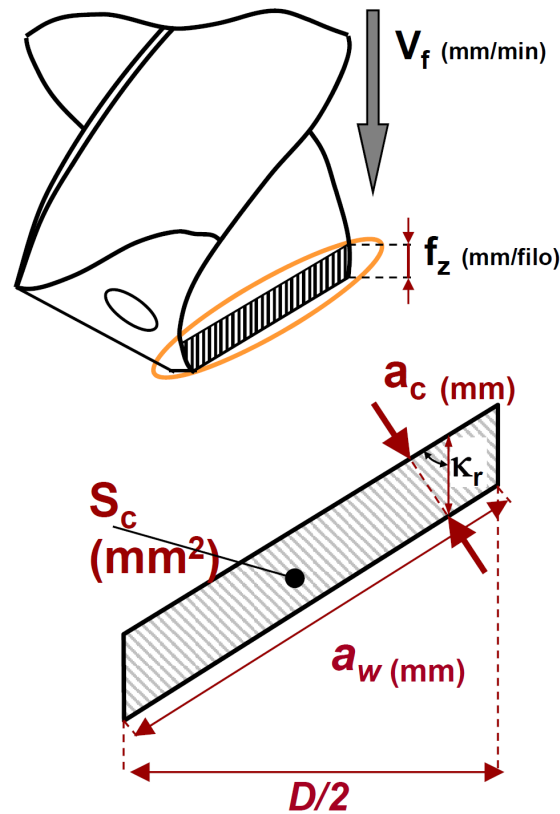


Figura 7: Descripción gráfica de los parámetros del taladrado [3].

2.2.1.5 Material y recubrimiento

En general los recubrimientos brindan propiedades que ayudan a evitar que el material se adhiera a los filos de la herramienta y a evitar el rápido desgaste por el calor generado durante el proceso de mecanizado o taladrado.

Existen una amplia variedad de revestimientos, cuatro de los más utilizados son el óxido negro, carburo de titanio (TiC), el nitruro de titanio (TiN) y el nitruro de titanio aluminio y diamante. Todos estos materiales tienen que buscar cualidades como dureza, que sea tenaz, no reactivo con el material taladrado, estable químicamente. Recubrimientos como el CVD (deposición química en fase de vapor). Las calidades con recubrimiento de CVD son la primera elección en una amplia gama de aplicaciones donde la resistencia al desgaste es importante. Para taladrado, las calidades de CVD suelen usarse en la placa periférica. También requieren una buena refrigeración, no resulta fácil evacuar el calor producido en el trabajo realizado en el agujero, así como lubricación para facilitar la salida de viruta.

Los refrigerantes-lubricantes a emplear en el taladro son:

- Aceros duros: Trementina, petróleo y aceites solubles.
- Fundición de hierro: En seco.
- Aluminio: Agua de sosa.
- Latón, bronce y fundiciones: En seco

Para el taladro en profundidad se utilizan brocas huecas a través de las cuales se hace pasar el líquido de refrigeración-lubricación. También se utiliza el aire a presión a alta velocidad [59].

2.2.1.6 Parámetros de corte

Los parámetros de corte o factores que definen las operaciones de taladrado principalmente son:

- Velocidad de giro del husillo del taladro o de rotación de la herramienta (N): es la velocidad angular de rotación del husillo del taladro, y por lo tanto, de la broca. Se suele expresar en r.p.m. (revoluciones por minuto). Se calcula en función de la velocidad de corte y del diámetro de la broca [60,61].

$$N = \frac{V_c \cdot 1000}{D \cdot \pi} \quad (2.1)$$

V_c = Velocidad de corte (m/min)

D = Diámetro de la broca (mm)

- Velocidad de corte (V_c): es la velocidad tangencial de la periferia de punta de la broca. Se suele expresar en m/min. Es un dato proporcionado por el fabricante de la herramienta para una vida de la herramienta de 15 minutos, y depende de muchos factores: del material de la pieza, del tipo de operación [60,61].

$$V_c = \frac{D \cdot \pi \cdot N}{1000} \quad (2.2)$$

D = Diámetro de la broca (mm)

N = Velocidad de la de rotación de la herramienta (rpm)

- Avance por revolución (f_n): es la distancia que avanza la broca en la pieza por cada revolución. Se suele expresar en mm/rev [60,61].

$$f_n = \frac{V_f}{N} \quad (2.3)$$

V_f = Velocidad de avance (mm/min)

N = Velocidad de la de rotación de la herramienta (rpm)

- Velocidad de avance (V_f): es la velocidad a la que la broca penetra en la pieza. Se suele expresar en mm/min [60,61].

$$V_f = f_z \cdot N \quad (2.4)$$

f_z = Avance (mm/rev)

N = Velocidad de la de rotación de la herramienta (rpm)

2.2.2. Fresado

2.2.2.1 Definición

Es un proceso de mecanización en el que el corte del material, se realiza con una herramienta rotativa que puede tener uno o varios filos, denominada fresa. Dicho corte de material se realiza combinando el giro de la herramienta con el desplazamiento, bien sea de la misma herramienta o de la pieza a trabajar. Dependerá del diseño de la máquina que lo que se desplace sea la herramienta, la mesa, o combine el desplazamiento de ambos. Dicho desplazamiento será en cualquier dirección de los tres ejes posibles en los que se puede desplazar la mesa, a la cual va fijada la pieza que se mecaniza [62].

La primera máquina de fresar se construyó en 1818 y fue diseñada por el estadounidense Eli Whitney con el fin de agilizar la fabricación de fusiles en el estado de Connecticut [63].

La orientación entre el eje de la herramienta y la dirección del avance es la característica que distingue al fresado del taladrado. En el taladrado, la herramienta de corte avanza en dirección paralela a su eje de rotación .

El eje de rotación de la herramienta cortante es perpendicular a la dirección de avance. Además, el fresado es una buena alternativa para producir agujeros, roscas, cavidades y superficies que hasta

la fecha solían tornearse, taladrarse o roscarse con macho [64].

Operaciones de mecanizado para piezas de gran variedad de formas, como piezas prismáticas, complejas, superficies inclinadas, ahí radica una de sus ventajas. También con este mecanizado se obtienen piezas con precisión y buen acabado superficial, sobre todo comparándolo con la fundición y la forja. Nos permite flexibilidad en los procesos que nos permiten ir desde la obtención de una pieza unitaria hasta largas series. La posibilidad de trabajar diferentes materiales, aunque si que es cierto que es muy difícil trabajar algunos materiales duros [10].

Para las operaciones de fresado, los fabricantes del sector aeronáutico utilizan a menudo herramientas de metal duro o de acero rápido, deben alcanzar los máximos niveles de calidad posibles, la productividad tiende a ser secundario. Los fabricantes se esfuerzan por lograr seguridad predecible de sus máquinas y herramientas. Los fabricantes deben disponer de fresas que ofrezcan siempre la misma duración de vida útil. Gracias a las tecnologías, los materiales como el titanio, Inconel o composites han pasado de ser casi imposibles de mecanizar a llegar a un punto en que se mecanizan con precisión y eficacia, dando lugar a una gran consistencia en fresas de metal duro [65].

En cualquier proceso de mecanizado intervienen varios factores que permiten o no la realización de la operación. Hay que destacar la relación directa entre el material de la pieza a mecanizar y el material de la herramienta. La clasificación del material de la pieza desde un punto de vista metalúrgico/mecánico, la geometría del filo que se vaya a utilizar y el material de la herramienta de corte son los tres factores que definen la maquinabilidad de un material, es decir, su capacidad de mecanizado [50].

2.2.2.2 Máquina

La fresadora es la máquina-herramienta que se utiliza para llevar a cabo el proceso de fresado, con sus múltiples opciones y variantes, las piezas que se realizan en fresadora son mucho más variadas y pueden ser de mayor complejidad respecto a las del torno. Los movimientos deben de ser precisos, hay que sujetar la pieza y las herramientas. La fresa trabaja a diferentes velocidades y debe tener la potencia suficiente. La relación entre la máquina y la pieza se ve facilitada por los movimientos de avance en cualquier dirección de ambos elementos.

Una fresadora es por tanto una máquina dotada de una herramienta de corte fijada al cabezal y provista de movimiento lineal en tres direcciones (X – Y – Z). La pieza irá fijada a la mesa por el procedimiento de fijación que se elija, y el desplazamiento en estas 3 direcciones es lo que se denomina los ejes de la máquina (de ahí fresadora de 3 ejes) [10, 62].

En una fresadora podemos distinguir las siguientes partes: Bastidor, Husillo principal, Caja de velocidades del husillo, Mesa longitudinal, Carro transversal, Consola, Caja de avances. En la Figura 8 se pueden observar las partes descritas [4].

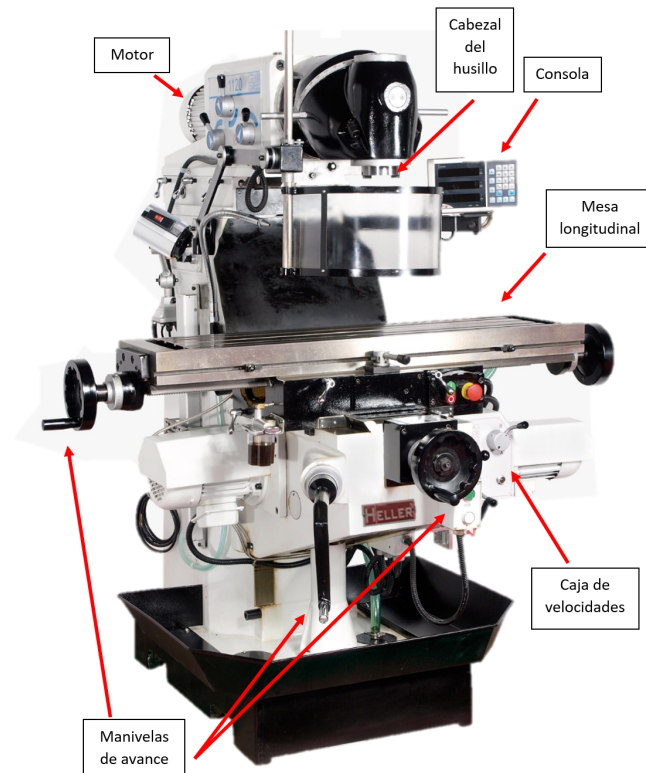


Figura 8: Partes de una fresadora [4].

Dependiendo de la orientación del cabezal principal tendríamos una fresadora vertical u horizontal, estas dos serían manuales. Aparte de la orientación del husillo, las máquinas fresadoras se clasifican dentro de los siguientes tipos: 1) rodilla y columna, 2) tipo bancada, 3) tipo cepillo, 4) fresas trazadoras y 5) máquinas fresadoras CNC o de control numérico [10]. En la Figura 9 se muestran dos ejemplos.

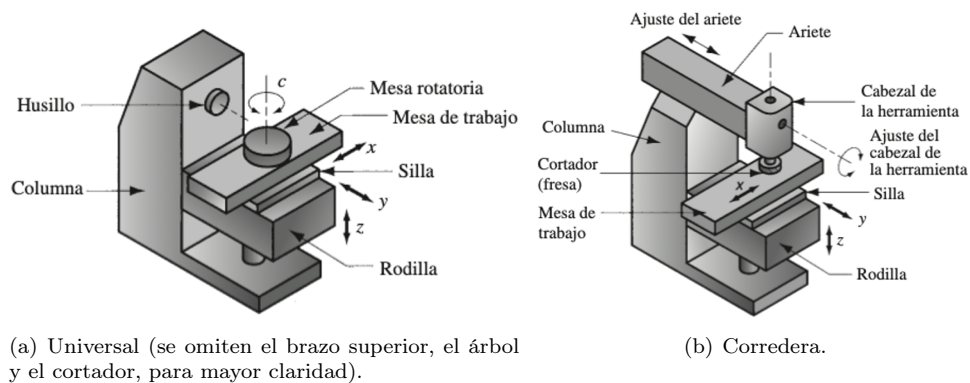


Figura 9: Tipos especiales de máquinas fresadoras de rodilla y columna [5]

■ Fresadora Vertical

Este tipo de fresadora se da en cuando el eje de la herramienta es perpendicular a la mesa de trabajo. Tanto la mesa como la herramienta pueden realizar un desplazamiento vertical; hecho que permite una mayor profundidad a la hora del corte, en la Figura 10 se muestran unos ejemplos.

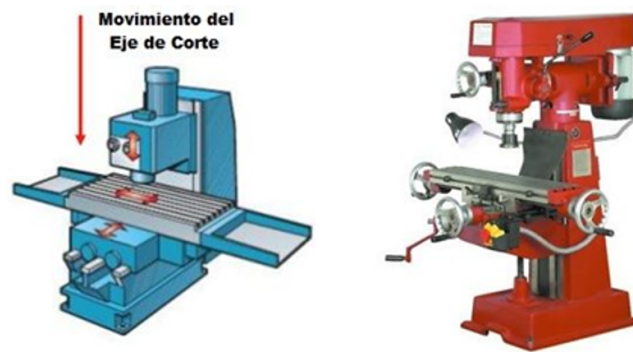


Figura 10: Fresadoras verticales [6].

■ Fresadora Horizontal

En la fresadora horizontal, el eje de rotación de la herramienta está horizontal a la mesa. Especialmente indicada para el labrado de ranuras o hendiduras, de muy distintas formas, en la Figura 11 se muestran unos ejemplos.

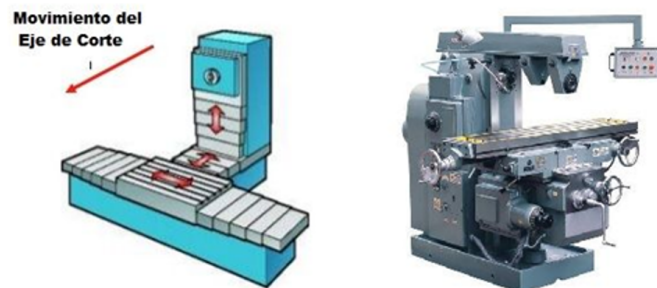


Figura 11: Fresadoras horizontales [6].

■ Fresadora CNC

Es la fresadora más actual. El control numérico se puede definir como una forma de automatización programable. Su principal aplicación en el volumen de producción, en la Figura 12 se muestra un ejemplo.



Figura 12: Fresadora CNC de 5 ejes [7].

2.2.2.3 Herramienta

La herramienta utilizada para mecanizar son las fresas, llevan dientes en su parte frontal y en la periferia de la misma, se distingue entre:

- Fresas cilíndricas y fresas frontales, se utilizan para trabajar superficies planas y en ángulo recto.
 - Las fresas cilíndricas tienen filos únicamente en su periferia.
 - Las fresas frontales cilíndricas tienen dientes no solamente en la periferia, sino también en una de las caras frontales.
- Fresas en forma de disco, se utilizan para fresar entalladuras estrechas
- Fresa con vástago, se usan las fresas de vástago con fresas frontales cilíndricas de pequeño diámetro. El vástago o mango sirve para sujeción.
- Fresas de forma:
 - Las fresas angulares son necesarias para la ejecución de guías prismáticas.
 - La fresa frontal angular se utiliza para el mecanizado de guías en ángulo.
 - Las fresas de un solo filo se utilizan para pequeños trabajos de fresado de forma [66].

En la Figura 13 se muestran alguno de los tipos de fresas.

FORMA				
DENOMINACIÓN	Fresa de planear, 45°	Fresa de escuadrar, 90°	Fresa de escuadrar 90° con mango Weldon	Fresa de gran desbaste
FORMA				
DENOMINACIÓN	Fresa de chafanar 60°	Fresa de dos cortes de mango cilíndrico, 2 labios, para chaveteros. HSS-Co8	Fresa frontal 4 labios. HSS-Co8. DIN-844-K	Fresas de desbaste, metal duro. DIN-6535-HA
FORMA				
DENOMINACIÓN	Fresa frontal, mango cónico. HSS-Co. DIN-846-K	Fresa de punta semiesférica 2 labios. TiAIN. DIN-844	Fresa de ranurado, tipo Woodruff. HSS-Co. DIN-850-D	Fresa para ranurar en T. HSS-Co. DIN-851
FORMA				
DENOMINACIÓN	Fresa angular. HSS-Co. DIN-1833-B	Fresa para ranuras cónicas. HSS-Co. DIN-1833-A	Avellanador cónico 90°. HSS. DIN-335-D	Avellanador cónico 60°, 3 labios. HSS. DIN-334

FORMA				
DENOMINACIÓN	Fresa frontal, filos de corte rectos. Metal duro integral	Fresa Tónica 2 labios. TiAIN	Broca de plaquetas. Plaquita de metal duro	Broca de plaqueta, refrigeración interna. Plaquita de metal duro
FORMA				
DENOMINACIÓN	Fresa 1/4 para rematado de aristas. HSS-Co8. DIN-6518N	Fresa para ranurar tres cortes dientes rectos. HSS-Co. DIN-885B	Fresa para ranurar tres cortes dientes cruzados. HSS-Co. DIN-885A	Fresa semicircular, angulares isóceles. HSS-Co. DIN-847
FORMA				
DENOMINACIÓN	Fresa de módulo para entallado de engranajes. HSS-Co	Fresa semicircular, angular. HSS-Co. DIN-842	Fresa de perfil semi-circular cóncava. DIN-855	Fresa de perfil semi-circular convexa. DIN-856
FORMA				
DENOMINACIÓN	Sierra circular para metales. HSS. DIN-1837	Fresa cilíndrica para planear. HSS-Co. DIN-884	Fresa frontal cilíndrica. HSS-Co	Fresa con mango cilíndrico corta. HSS-Co5

Figura 13: Tipos de fresas [8].

■ Geometría

Las fresas son piezas giratorias, se construyen generalmente en acero rápido, pero, dado el elevado costo de este material, las fresas de mayor tamaño poseen un cuerpo de acero de construcción y en la parte cortante tienen incorporadas cuchillas (o dientes) de acero rápido o bien insertos de corte (widia) que pueden ser permanentes o intercambiables [67].

Todas estas partes cortantes (o filos) están normalmente dispuestas de manera simétrica alrededor de un eje y su función es eliminar progresivamente el material de la pieza de trabajo transformándola en una pieza acabada, con la forma y las dimensiones deseadas [67].

Existe una multitud de fresas, cada una para una operación específica de fresado y para un trabajo determinado. Cubren una diversa gama de materiales, desde metales hasta madera y plásticos, y la mayoría se encuentra disponible para aceros, fundición gris blanca y metales no ferrosos (tipo N), materiales duros y tenaces (tipo H) y materiales blandos (tipo W) [67].

De hecho, la inmensa variedad existente de fresas admite un sinnúmero de clasificaciones. En general, podemos agruparlas en las siguientes categorías:

- Por método de fresado: fresas para fresado frontal y fresas para fresado periférico (concordante o discordante).
- Por tipo de construcción: fresas enterizas, fresas calzadas y fresas con dientes reemplazables.
- Por tipo de superficie o perfil de incidencia de la fresa: superficie fresada y superficie escalonada.
- Por la forma de los canales entre los dientes: fresas de canales rectos, fresas de canales helicoidales y fresas de canales bi-helicoidales.
- Por la dirección de corte de las fresas: fresas para corte a la derecha, fresas para corte a la izquierda.
- Por el montaje o la fijación de las fresas en la fresadora: fresas frontales, fresas de mandril y fresas de vástago.
- Por la geometría: Cilíndricas periféricas (con dentado recto, con dentado helicoidal y acopladas); Cilíndricas frontales sin vástago; De disco (con dentado recto, con dentado cruzado o alterno y con dentado en cruz); Acopladas ajustables; Sierras circulares; Angulares sin vástago (frontales y prismáticas); Fresas con vástago (cilíndrico frontales, cónicas y angulares); De perfil constante (destalonadas convexas y cóncavas, de módulo y múltiples); Compuestas; Fresas madre [67,68].

La herramienta se divide en mango, cuello y cuerpo, ver Figura 14 donde se pueden ver las partes en las que se divide la herramienta.

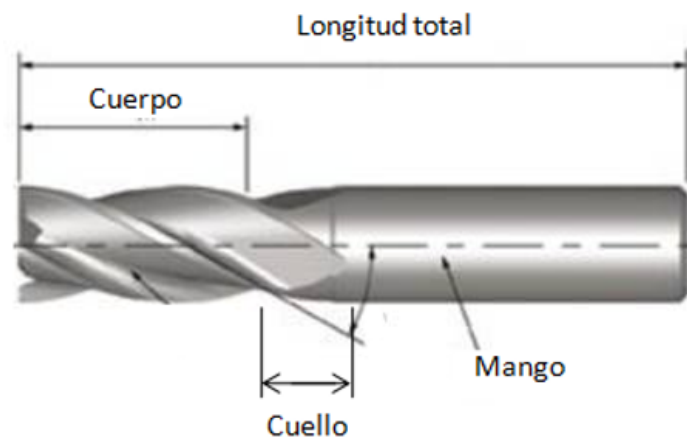


Figura 14: Partes de una herramienta para fresado [9].

En cuanto a la zona cortante, suele disponer de varios filos, cada uno compuesto por un filo principal, filo secundario, superficie de incidencia, superficie de desprendimiento y la punta del diente. En este caso, tanto el filo principal y secundario están mecanizando, a diferencia del taladrado que solo lo realiza el filo primario, ver Figura 15.

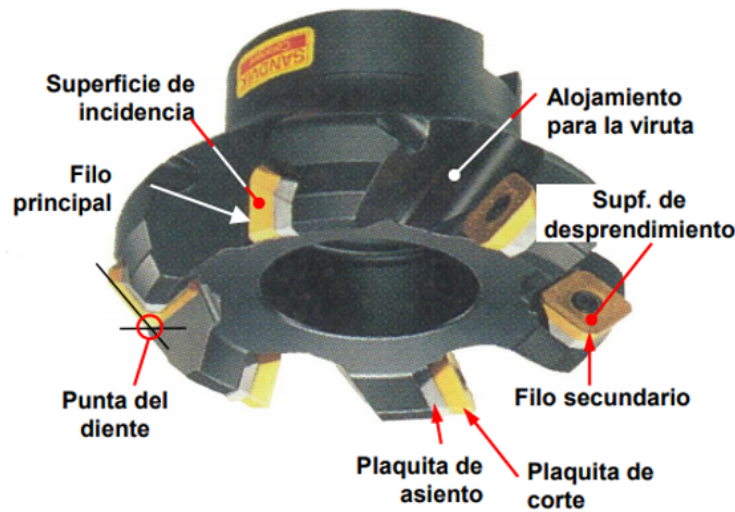


Figura 15: Filos zona cortante herramienta fresado [10].

Filo de corte principal, produce el arranque de la viruta atacando la superficie de transitoria de la pieza. El filo de corte secundario: Arista cuya intersección con el filo principal determina la punta de la herramienta. Mientras que el canal de evacuación favorece la extracción de la viruta en el proceso de mecanizado [10].

■ Material y recubrimiento

La calidad del material de la fresa es un factor a tener en cuenta en la planificación productiva de mecanizado, para ello hay que tener conocimiento del rendimiento para poder hacer una elección adecuada.

Los materiales deben tener una combinación de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste, un buen material debe ser lo suficientemente duro como para resistir el desgaste en incidencia y la deformación; tenaz para resistir la rotura del núcleo; no reactivo con el material de la pieza; químicamente estable para resistir la oxidación y la difusión; resistente a los cambios térmicos repentinos [69].

Material de herramienta de metal duro con recubrimiento: estos son el 80-90 % de todas las plaquitas de mecanizado. Tienen una exclusiva combinación de resistencia al desgaste y tenacidad, y su capacidad para adoptar formas complejas [69].

- Recubrimiento: CVD
- Recubrimiento: PVD
- Metal duro

Recubrimiento: CVD (deposición química en fase de vapor), resultan ser la primera elección cuando el desgaste es importante: El recubrimiento de CVD se genera a partir de reacciones químicas a temperaturas de 700-1050°C, presentan una gran resistencia al desgaste y excelente adherencia al metal duro, se distinguen los siguientes:

- Recubrimientos de carburo de titanio (TiC).
- Recubrimientos de alúmina (Al_2O_3) de baja conductividad térmica e inerte químicamente.
- Recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) se utiliza para detectar el desgaste.
- Recubrimiento de carbonitruro de titanio (MT-Ti(C,N) o MT-TiCN, (proporciona resistencia al desgaste abrasivo) también llamados MT-CVD, este último tiene la capacidad de conservar la interfaz de metal duro intacta [69].

La aplicación del recubrimiento CVD es utilizado en el torneado general de aceros inoxidables y para calidades de fresado en ISO P, ISO M, ISO K .

Recubrimiento: PVD (deposición física en fase de vapor) (PVD) se forman a temperaturas relativamente bajas (400-600°C). El proceso implica la evaporación de un metal que reacciona con, por ejemplo, nitrógeno para formar un recubrimiento de nitruro duro en la superficie de la herramienta de corte. Estos recubrimientos aumentan la resistencia al desgaste de la calidad gracias a su dureza. Además, sus fuerzas de compresión también aportan al filo tenacidad y resistencia a las fisuras perpendiculares [69]. Los principales componentes son :

- PVD-TiN: el nitruro de titanio fue el primer recubrimiento de PVD. Presenta propiedades de aplicación general y un color dorado;
- PVD-Ti(C,N): el carbonitruto de titanio es más duro que el TiN y añade resistencia del desgaste en incidencia;
- PVD-(Ti,Al)N: el nitruro de titanio aluminio presenta una gran dureza combinada con una buena resistencia a la oxidación, lo que mejora las resistencia al desgaste general;
- Óxido de PVD: se emplea por su estabilidad química y resistencia al desgaste en cráter optimizada.

La aplicación PVD están recomendadas para filos tenaces y agudos a la vez, además de para materiales pastosos, también son habituales en aplicaciones de acabado [70].

Metal duro: es un material pulvimetalúrgico; un compuesto de partículas de carburo de tungsteno (WC) y un aglomerante rico en cobalto (Co) metálico. Los metales duros para aplicaciones de mecanizado se componen de más del 80 % de fase WC dura. La cantidad y la composición del aglomerante rico en Co controlan la tenacidad de la calidad y la resistencia a la deformación plástica. Los carbonitruros cúbicos, también denominados fase , suelen añadirse para incrementar la resistencia al calor y para formar gradientes que se utilizan para dar resistencia a la deformación plástica. Más allá del filo, un aglomerante rico en estructura de tungsteno de metal duro inhibe las fisuras y la rotura por martillado de la viruta [69].

- Los tamaños de grano WC de medios a gruesos ofrecen al metal duro una combinación superior de gran resistencia al calor y tenacidad. Estos se emplean en combinación con recubrimientos de CVD y PVD en calidades para todas las áreas.
- Tamaño de grano WC fino o submicra, se utiliza para crear filos agudos con un recubrimiento de PVD que mejora aún más la resistencia del filo

Sus aplicaciones típicas son las brocas de metal duro enterizas, las fresas de ranurar de metal duro enterizas, las plaquitas de tronzado y ranurado, fresado y calidades para acabado [69].

2.2.2.4 Parámetros de corte

En el fresado, el movimiento y la velocidad de la herramienta se especifica a partir de varios parámetros. Estos parámetros varían en función de las especificaciones del agujero y la herramienta que dispongamos. Los parámetros principales del fresado son:

- Velocidad de corte (V_c)

Es la velocidad relativa entre la pieza y la herramienta. Más específicamente es la velocidad relativa entre la arista de corte de la herramienta y la superficie a mecanizar de la pieza, las unidades de la V_c vienen definidas en (m/min).

$$V_c = \frac{D \cdot \pi \cdot N}{1000} \quad (2.5)$$

D = Diámetro de la broca (mm)

N = Velocidad de giro de la herramienta (rpm)

■ Velocidad de giro de la herramienta (N)

La velocidad de rotación de la herramienta es directamente proporcional a la velocidad de corte y al diámetro de la herramienta, las unidades de la N vienen definidas en (rpm).

$$N = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (2.6)$$

D = Diámetro de la broca (mm)

V_c = Velocidad de corte (m/min)

■ Velocidad de avance (V_f)

Es la velocidad del movimiento de la herramienta de corte en relación con la pieza de trabajo a medida que la herramienta realiza un corte, las unidades de la V_f vienen definidas en (mm/rpm).

$$V_f = f_z \cdot z \cdot N \quad (2.7)$$

f_z = Avance por diente (mm/rev)

z = Número de dientes de la herramienta

N = Velocidad de giro de la herramienta (rpm)

En la Figura 16 se puede ver todos los parámetros descritos en el fresado.

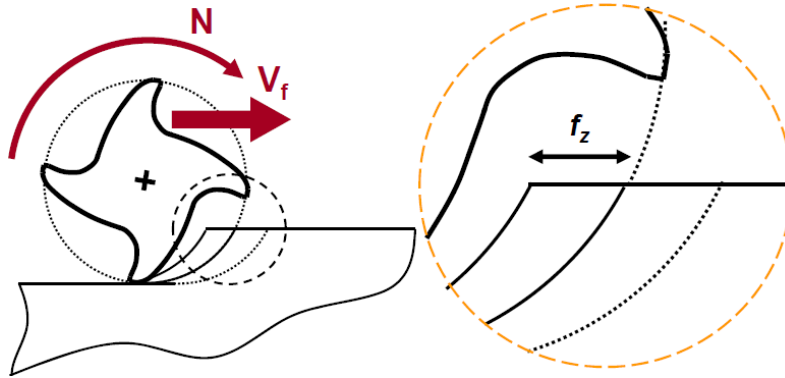


Figura 16: Parámetros de corte [10].

Es importante también hacer referencia a los siguientes parámetros:

• Profundidad de pasada radial (a_e)

La anchura de corte radial (a_e) es la anchura de la pieza sobre la que actúa el diámetro de la fresa. Es el espacio transversal de la superficie mecanizada o, si el diámetro de la herramienta es reducido, el que queda cubierto por la herramienta, como se trata de una distancia se mide en (mm) [11].

• Profundidad de pasada axial (a_p)

La profundidad de corte axial (a_p) es la parte de metal que la herramienta elimina de la superficie de la pieza. Es la distancia a la que se ajusta la herramienta por debajo de la superficie sin mecanizar, como se trata de una distancia se mide en (mm) [11].

En la Figura 17, se muestran estos dos parámetros junto con la velocidad de giro de la herramienta (N) y la velocidad de corte (V_c).

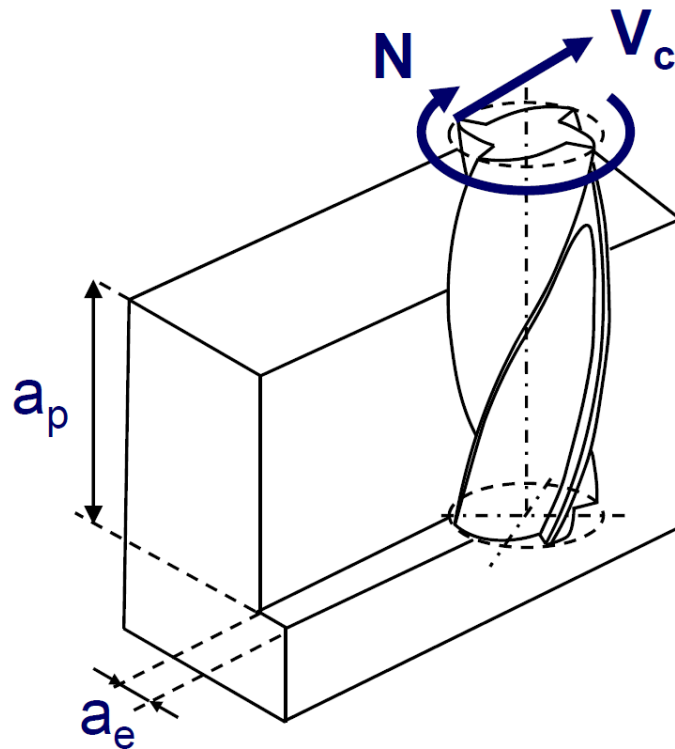


Figura 17: Profundidad de la pasada axial y radial [10].

- Sentido de giro
 - Fresado en oposición (up milling)
La dirección de avance de la pieza es opuesta a la de rotación de la fresa en el área del corte.

En el fresado hacia arriba (convencional) el grosor de la viruta empieza desde cero y se va incrementando hasta el final del corte, en la Figura 26 se muestra un esquema del movimiento. 27 se muestra un esquema del movimiento [11].

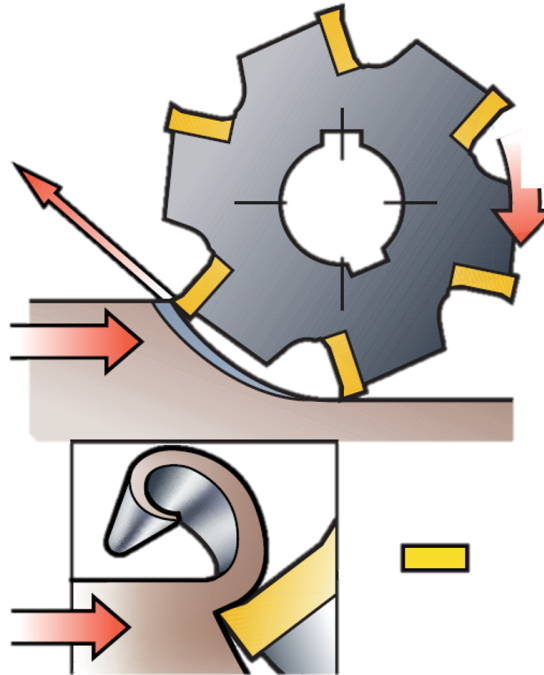


Figura 18: Fresado en oposición (up milling) [11].

- Fresado en concordancia (down milling)

Si se utiliza fresado hacia abajo, se evita el efecto de bruñido, de modo que se produce menos calor y la tendencia al endurecimiento mecánico es mínima.

En el fresado hacia abajo (a favor) la herramienta inicia el corte con un grosor de viruta grande, en la Figura 27 se muestra un esquema del movimiento [11].

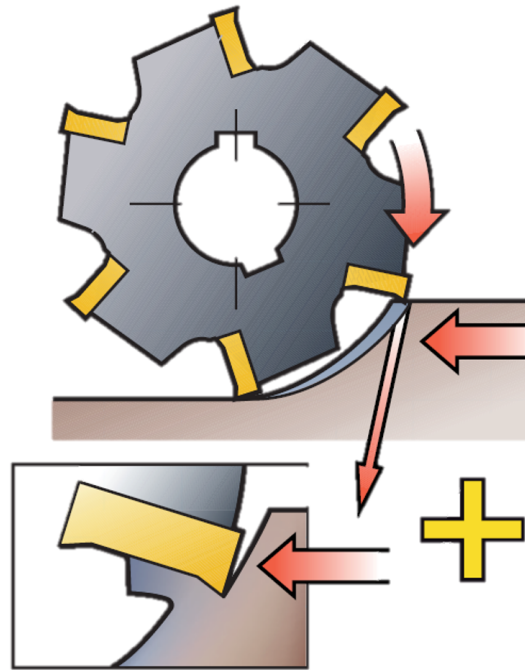


Figura 19: Fresado en concordancia (down milling) [11].

2.2.3. Fresado Helicoidal

2.2.3.1 Definición

El fresado helicoidal en parte de la industria es también conocido como taladrado orbital. De manera resumida se trata de un proceso de mecanizado que une el taladrado y el fresado en una misma acción.

El proceso consigue rotar una herramienta de corte alrededor de su propio eje y simultáneamente alrededor de un eje central desplazado, primero desarrolla el taladrado y acto seguido comienza a fresar, realiza un movimiento axial acompañado del movimiento horizontal, creando una cavidad superior al diámetro de la herramienta [12], en la Figura 20 se observa el proceso del fresado helicoidal.

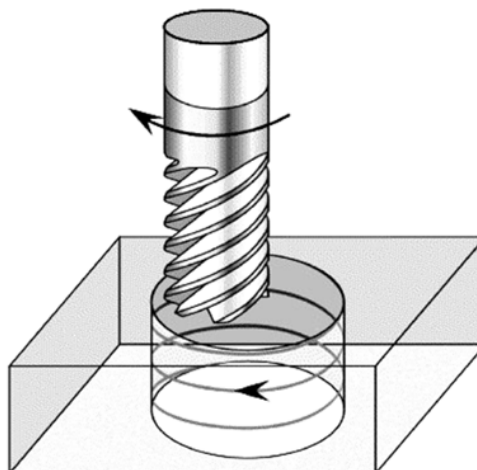


Figura 20: Proceso fresado helicoidal [12] .

Debido a su cinemática flexible, se pueden lograr bajas fuerzas de corte, mayor eficiencia de evacuación de viruta, desgaste de la herramienta y una mejor calidad de perforación. Esto hace que se consiga una alta productividad y un descenso en los costes de producción [2].

El sector aeronáutico ha mostrado un gran interés en esta estrategia, ya que la operación de taladrado es necesaria previa al montaje de sus componentes y se repite miles de veces, alrededor de 85.000 veces en un avión de pasillo único [44].

El fresado helicoidal combina tres movimientos: avance, rotación del herramienta y rotación orbital, lo que da como resultado un movimiento helicoidal de la herramienta a través del material. Como consecuencia del movimiento se genera un espacio de mecanizado superior al volumen de la herramienta, por lo que existe una mayor refrigeración [71].

En cuanto a las ventajas de este tipo de proceso, la versatilidad del proceso permite que se puedan realizar los agujeros de diferentes dimensiones sin la necesidad de modificar la herramienta tiene una serie de beneficios asociados como es la reducción de herramientas [72].

Un ejemplo de mejora en la industria aeronáutica se encuentra en Airbus. En Airbus de Toulouse, Francia, reportó un aumento en su tasa anual de ensamblaje de flap de 30 a 300 unidades en su A321 mediante el uso de una máquina automatizada de remachado de estructuras cerradas (AROCS) con una unidad de extremo de perforación orbital que perfora la cubierta y el marco del flap en una sola pasada, sin tener que desmontarlos para desbarbar y limpiar. Posteriormente, Airbus adoptó fresado helicoidal para flaps en todos sus modelos de aviones comerciales [73].

Sin embargo, no todo son ventaja en este tipo de procesos y se pueden encontrar también numerosos problemas.

- La flexión de la herramienta de corte y los problemas de vibración pueden llevar a una alta tolerancia y mala calidad de la superficie.
- Introduce tensiones residuales de compresión reducidas en la pared del orificio, lo que lleva a una disminución de la vida útil de la herramienta, como consecuencia de la cinemática de corte modificada [74].
- Tiene mayor tiempo de operación respecto al taladrado convencional para realizar un agujero de mismas dimensiones.

2.2.3.2 Material y herramienta

■ Herramienta fresa helicoidal

Las fresas helicoidales, son fresas con plaquitas indexables, formadas por un filo principal y un secundario, que permiten eliminar el material de forma axial y radial [13].

En las fresas de mango podemos diferenciar:

- Zona activa. En esta parte de la herramienta encontramos la longitud de corte y el diámetro de corte de la fresa. La longitud de corte es la máxima dimensión con la que se puede mecanizar lateralmente en una pasada y el diámetro de corte es la máxima dimensión con la que se puede mecanizar frontalmente en una pasada.
- Mango. En esta zona de la herramienta se localizará el diámetro y la longitud del mango. A través de esta parte sujetaremos la herramienta [75].

En la Figura 21 se muestra la herramienta con las partes descritas.

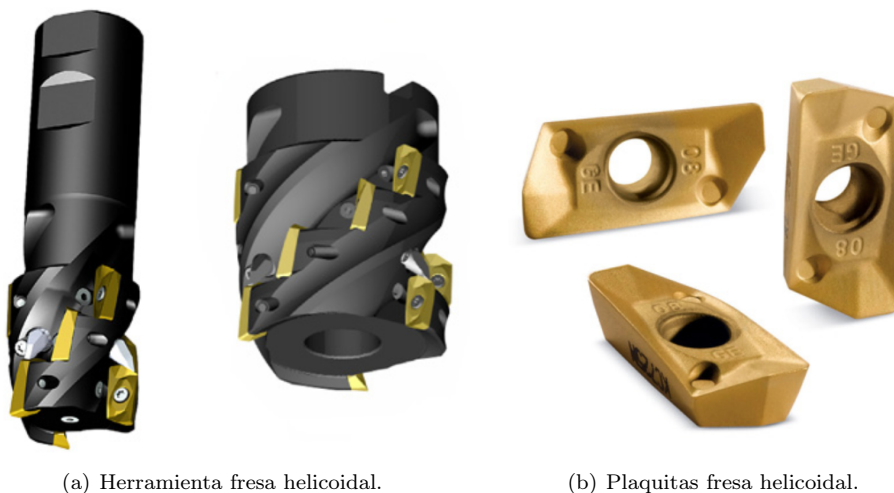


Figura 21: Herramienta para el fresado helicoidal.

Las partes de una fresa de plaquitas intercambiables: cuerpo de fresa, la plaquita y el sistema de sujeción de la plaquita.

- El cuerpo de fresa. Es el elemento que soportará las plaquitas y que a través del agujero de la fresa (diámetro del agujero) y de un útil de sujeción será amarrado a la fresadora. Este elemento estará diseñado de tal forma que permita la evacuación adecuada de la viruta. El diseño y denominación dependerá de cada fabricante de herramientas.
- La plaquita. Es el elemento que realizará el arranque de viruta e irá apoyada en el asiento para tener un buen apoyo plano. El diámetro máximo formado por las aristas de corte de las plaquitas será el diámetro de corte.
- Sistema de sujeción. Este sistema variará en función del tipo de fresa y del fabricante de herramientas [75]. Blocaje tipo S por tornillo, blocaje de cuña, blocaje por fijación central, blocaje por acción elástica.

En la Figura 22 se puede observar en la foto (a) la herramienta para el fresado helicoidal y en la foto (b) las plaquitas.



(a) Herramienta fresa helicoidal.

(b) Plaquitas fresa helicoidal.

Figura 22: Herramienta fresa helicoidal y una ampliación de las plaquitas [13]

En este tipo de mecanizado la evacuación de viruta es más fácil que en otros procesos, siendo posible el aporte de aire o refrigerante a alta presión que favorece la eliminación de la viruta. Para un fresado helicoidal óptimo, el diámetro de la fresa debe estar entre el 60 % y 90 % del diámetro del orificio que deseamos realizar.

En general, se emplean un pequeño número de dientes y un elevado ángulo de hélice para producir una acción de corte suave y sin vibraciones, y buenos acabados superficiales. El

ángulo de hélice permite que la fresa absorba la mayor parte de la carga final, por lo que puede entrar y salir fácilmente de la pieza [72].

■ Material

Cuando hablamos de material nos referimos al material de la fresa y el material que queremos mecanizar. En función de las propiedades del material habrá que utilizar una fresa específica.

Con respecto a las fresas, hay una multitud de ellas y cada una para una operación específica de fresado y para un trabajo determinado. Cubren una diversa gama de materiales, desde metales hasta madera y plásticos, y la mayoría se encuentra disponible para aceros, fundición gris blanca y metales no ferrosos (tipo N), materiales duros y tenaces (tipo H) y materiales blandos (tipo W) [67].

Se suelen identificar tres factores principales para determinar la maquinabilidad de un material, es decir, su capacidad de ser mecanizado.

- La clasificación del material de la pieza desde un punto de vista metalúrgico/mecánico.
- La geometría del filo que se vaya a utilizar, a nivel micro y macro.
- El material de la herramienta de corte (calidad) con sus componentes, por ejemplo, metal duro con recubrimiento, cerámica, cermet, CBN o PCD [69, 76].

Generalmente, el proceso de fresado helicoidal se aplican en materiales difíciles de cortar a parte de aleaciones de titanio como el plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP), materiales duros y otros materiales aeroespaciales. En el caso de la fibra de carbono, uno de los problemas es la delaminación, visible en la superficie del agujero [72].

La industria del corte del metal utiliza una gran variedad de materiales que se ven influidos por los elementos de aleación, el tratamiento térmico y la dureza. Esto es determinante a la hora de la elección de la geometría, la calidad y los datos de corte de la herramienta. Para simplificar la elección, se dividen en seis grandes grupos, conforme al estándar ISO, y cada grupo tiene sus propiedades: Acero (sin alear, de baja aleación o de alta aleación), acero inoxidable (ferrítico y martensítico, austenítico y superaustenítico, inoxidable dúplex, fundición (maleable y fundición gris, nodular, grafito compacto, ductil austemperizada, materiales no féreos, superaleación termorresistente, titanio y acero templado [76].

■ Lubricación

Dentro del proceso de mecanizado de una pieza entran diversos factores a tener en cuenta, desde el material a mecanizar, la máquina a utilizar, sujeción de la pieza, y herramientas. El lubricante ya en estado puro (aceite de corte) o emulsionado con agua (taladrina) puede ser tan importante como el recubrimiento o tipo de geometría de herramienta que utilizamos. La selección incorrecta del lubricante puede hacer que la viruta no se desaloje correctamente, o que la temperatura en el punto de trabajo supere la requerida por el recubrimiento [77].

La lubricación permite rebaja el coeficiente de fricción que se produce entre herramienta y pieza. Como consecuencia se produce una modificación favorable de la geometría de la viruta y de los ángulos. Estos factores, en conjunto, facilitan la evacuación de viruta e impiden una generación excesiva de calor en el proceso de corte. También, la fuerza de corte disminuye notablemente y se reducen las posibilidades de formación del filo recreado.

El lubricante también trabaja como refrigerante, influyendo en la vida de las herramienta, al disminuir la fricción, evita, la generación excesiva de calor en el contacto del material y la herramienta.

En el fresado helicoidal, se utiliza para el recubrimiento el MQL. Esta puede mejorar la calidad geométrica, reducir la temperatura y los niveles de fuerza, produce una evacuación de

viruta y reduce el desgaste.

Debido a razones económicas, ecológicas y técnicas, hoy día se está intentando disminuir el uso de aceites y fluidos de corte. Hay estudios que mantienen que en el fresado helicoidal se puede utilizar el enfriamiento por aire, siendo más ecológico, económico y seguro [73].

Es por lo que los refrigerantes están planteando problemas medioambientales y muchos problemas están relacionados con la eliminación de residuos. Sin embargo, se prevé que el creciente número de aplicaciones industriales y las actividades de investigación en curso en el campo de MQL y el mecanizado en seco respaldarán y, en última instancia, darán lugar a la expansión de estas tecnologías modernas de alto rendimiento a pequeños y medianos fabricantes [78].

2.2.3.3 Cinemática y parámetros de corte

La cinemática del fresado helicoidal posee una mayor complejidad que la del fresado o taladrado convencional. Debido a que en el fresado helicoidal existen un gran número de parámetros.

En los diferentes artículos leídos, todos los investigadores coinciden con lo mismo, la gran cantidad de nomenclaturas que existen. Esto dificulta la comprensión de otros artículos, por lo cual resulta complicado entender los parámetros óptimos logrados en otras investigaciones.

Para describir el movimiento de la herramienta es importante definir dos sistemas de coordenadas: el sistema de coordenadas de la pieza y el sistema de coordenadas de la herramienta. El sistema de coordenadas de la pieza presenta una dirección de eje de coordenadas fija x, y, z, mientras que el sistema de coordenadas de la herramienta cambia con la rotación de la herramienta y la revolución orbital. El sistema de coordenadas de la pieza es la referencia para la cinemática de fresado helicoidal [79, 80].

De igual forma que en procesos anteriores, las condiciones de corte quedan definidas por la velocidad de avance, velocidad de corte y profundidad de corte.

En el fresado helicoidal hay que distinguir entre los diferentes diámetros, medidos en mm: Diámetro de la herramienta (D_t), Diámetro del agujero (D_b), Diámetro de la hélice (D_h).

■ Velocidad de corte (V_c)

Es uno de los parámetros más importantes en cualquier mecanizado, debido a la gran influencia que tiene sobre algunos procesos como la temperatura, este proceso a su vez relacionado con la calidad de la pieza resultante. Las unidades de la V_c son (m/min). Como ya se ha indicado previamente es importante diferenciar entre los distintos diámetros.

$$V_c = \frac{D_t \cdot \pi \cdot N}{1000} \quad (2.8)$$

D_t = Diámetro de la herramienta (mm)

N = Velocidad de giro de la herramienta (rpm)

■ Velocidad de avance (V_f)

La cinemática del fresado helicoidal se puede describir mediante la descomposición de la trayectoria helicoidal. La velocidad de avance se puede descomponer en la velocidad de avance tangencial (V_{ft}) y en la velocidad de avance axial (V_{fa}) que a su vez describen un movimiento circular en xy del plano CNC y un movimiento lineal en la dirección z del eje. En la Figura

23 se descompone la velocidad de avance, para facilitar el entendimiento del movimiento helicoidal [15, 81].

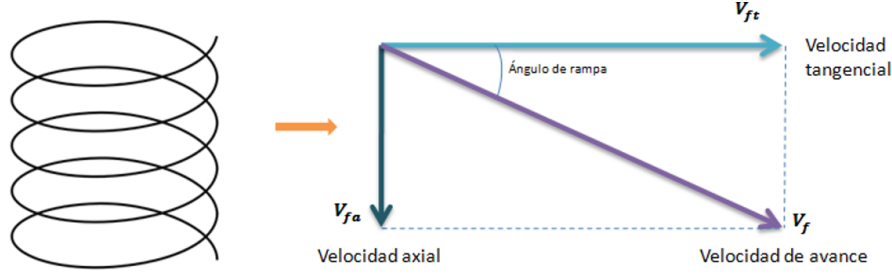


Figura 23: Descomposición trayectoria helicoidal.

$$V_f = \sqrt{V_{fa}^2 + V_{ft}^2} \quad (2.9)$$

V_{fa} = Velocidad axial (mm/min)

V_{ft} = Velocidad tangencial (mm/min)

La trayectoria lineal, la velocidad de avance axial que se mide en mm/min queda definida como:

$$V_{fa} = N \cdot f_{za} \cdot z \quad (2.10)$$

N = Velocidad de giro herramienta (rpm)

f_{za} = Avance axial por diente (mm/diente)

z = Número de dientes

En la trayectoria circular, la velocidad de avance tangencial, que es la velocidad circular del punto central de la herramienta (TCP) relacionada con el diámetro helicoidal (D_h) queda definido como:

$$V_{ft} = \frac{D_h}{D_b} \cdot V_t \quad (2.11)$$

$$V_t = N \cdot f_{zt} \cdot z \quad (2.12)$$

V_t = Velocidad tangencial (mm/min)

N = Velocidad de giro herramienta (rpm)

f_{zt} = Avance tangencial por diente (mm/diente)

z = Número de dientes

D_h = Diámetro hélice (mm)

D_b = Diámetro del agujero (mm)

En estas ecuaciones se puede observar el parámetro de avance por filo/diente (f_z). En el fresado helicoidal hay que distinguir los dos avances; el axial (f_{za}), correspondiente a la trayectoria de bajada, y el tangencial (f_{zt}), correspondiente a la trayectoria circular. La unidad es mm/diente o mm/min.

- Ángulo de la hélice (α)

$$\alpha = \arctan \left(\frac{V_{fa}}{V_{ft}} \right); \quad (2.13)$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{a_p}{\pi \cdot D_h} \right) \quad (2.14)$$

V_{fa} = Velocidad de avance axial (mm/min)
 V_{ft} = Velocidad de avance tangencial (mm/min)
 D_h = Diámetro de la hélice (mm)
 a_p = Profundidad de pasada axial (mm)

■ Profundidad de pasada axial (a_p)

La profundidad de pasada axial ha sido explicada anteriormente en el fresado, sus unidades son en (mm).

$$a_p = \tan(\alpha) \cdot \pi \cdot D_h; \quad (2.15)$$

$$a_p = \frac{f_{za} \cdot \pi \cdot D_b}{f_{zt}} \quad (2.16)$$

α = Ángulo de la hélice ($^\circ$)
 D_h = Diámetro de la hélice (mm)
 D_b = Diámetro del agujero (mm)
 f_{za} = El avance axial por diente (mm/diente)
 f_{zt} = El avance tangencial por diente (mm/diente)

■ Profundidad de pasada radial (a_e)

A la hora de definir la ecuación que define la profundidad de pasada radial existe controversia entre algunos autores ya que está se puede definir como la relación entre el área total a eliminar y la longitud de la trayectoria circular, la unidades de a_e se miden en (mm).

$$a_e = \frac{\pi \cdot D_b^2}{4} \cdot \frac{1}{\pi \cdot D_h} = \frac{D_b^2}{4 \cdot D_h} \quad (2.17)$$

D_b = Diámetro del agujero (mm)
 D_h = Diámetro de la hélice (mm)

En la ecuación 2.17 se observa que la profundidad de pasada radial (a_e) solo depende de los diámetros del agujero y la hélice (D_b, D_h). Sin embargo, otros investigadores consideran que el diámetro de la herramienta también influye (D_t), definiendo la ecuación de la siguiente forma [82, 83]:

$$a_e = \frac{D_b^2 - D_t^2}{4 \cdot D_h} \quad (2.18)$$

D_b = Diámetro del agujero (mm)
 D_h = Diámetro de la hélice (mm)
 D_t = Diámetro de la herramienta (mm)

■ Excentricidad (ϵ) La excentricidad es el radio de la órbita que realiza la herramienta, la distancia ente el punto central del agujero y el punto central de la herramienta (TCP), su unidad es el (mm).

$$\epsilon = \frac{D_h}{2} = \frac{D_b - D_t}{2} \quad (2.19)$$

D_b = Diámetro del agujero (mm)
 D_h = Diámetro de la hélice (mm)
 D_t = Diámetro de la herramienta (mm)

En la Figura 24, se pueden ver todos los parámetros descritos en el fresado helicoidal.

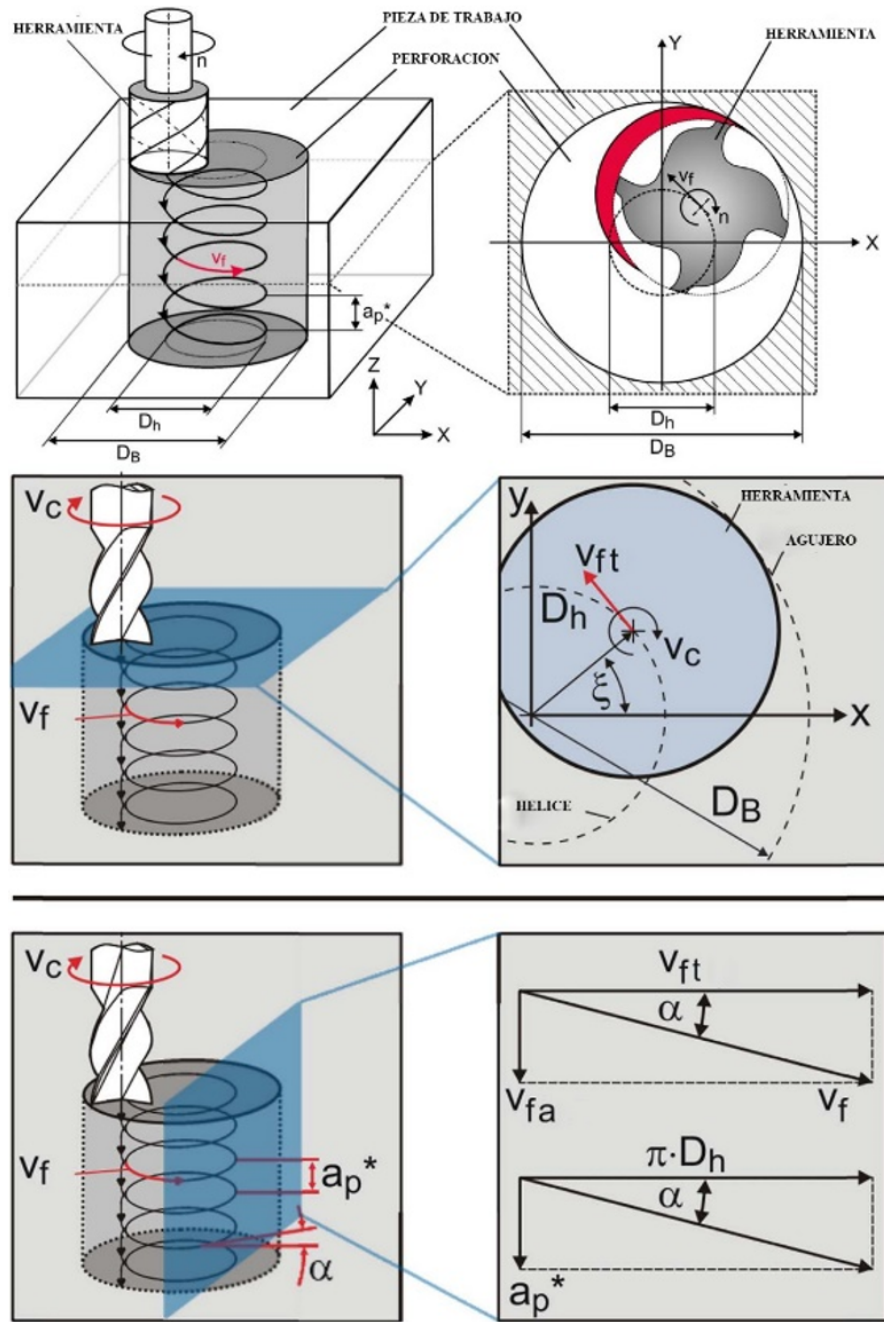


Figura 24: Parámetros de corte fresado helicoidal [14,15]

- Viruta Además de todos los parámetros ya mencionados, también hay que hacer referencia a la viruta generada durante el mecanizado. La viruta es todo aquel fragmento de material que se desprende durante el proceso de mecanizado, puede adoptar una forma curvada o en espiral. Como punto a destacar, la viruta permite ayudar a saber si el mecanizado se está realizando de manera óptima dependiendo de la forma de esta. La viruta queda definida en la Ecuación 2.20.

$$S = f \cdot a_p \quad (2.20)$$

S = Sección de la viruta (mm^2/rev)

f = Avance (mm/rev)

a_p = Profundidad de pasada axial (mm)

Dependiendo de los parámetros elegidos, se obtendrá un tipo de viruta u otra, a continuación se va a estudiar los diferentes tipos de viruta:

- Viruta continua: Las virutas continuas se suelen formar cuando los materiales son dúctiles, y el mecanizado se está realizando con pequeños avances, altas velocidades de corte y/o grande ángulos de ataque.

Este tipo de viruta no es deseable, debido a que una viruta continuada tiende a enredarse en el portaherramientas, en los soportes y en la pieza. Provocando que en ocasiones se tenga que parar el mecanizado, no obstante este problema se puede aliviar utilizando un rompeviruta [84].

- Viruta segmentada: También conocidas como viruta escalonada, son semicontinuas, con zonas de baja y alta deformación por cortante. Este tipo de comportamiento se observa en materiales tenaces, baja conductividad térmica y resistencia que disminuye rápidamente con la temperatura, un ejemplo de este tipo de materiales es el Titanio, uno de los materiales utilizados en este estudio [84].
- Viruta discontinua: Este tipo de viruta por lo general se forma en materiales con una baja resistencia por cortante, este tipo de materiales por lo general son materiales frágiles, duros y quebradizos. La evacuación de la viruta en este caso se realiza de manera de forma sencilla.

El principal problema que se encuentra en este tipo de viruta es que ocasiona que la fuerza de corte varíe constantemente, por lo cual si el portaherramientas o los dispositivos de sujeción de la pieza no se encuentran bien fijados puede ocasionar grandes vibraciones y un desgaste prematuro de la herramienta [84].

En la Figura 25 se pueden observar los distintos tipos de viruta comentados.

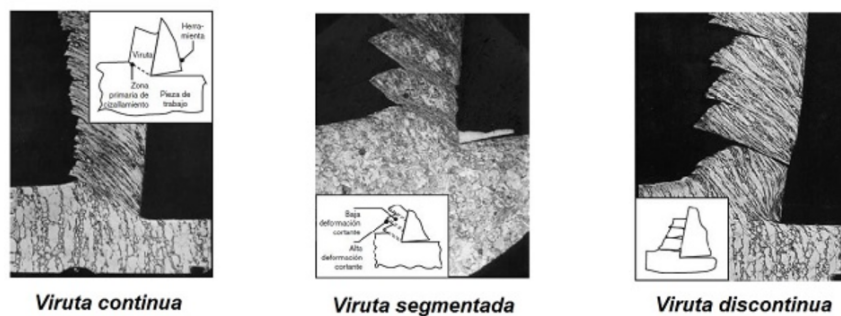


Figura 25: Tipos de viruta [16]

Es importante comentar que la viruta solo se recoge durante el mecanizado de la aleación de Titanio (UNS R56400), debido a que al mecanizar CFRP, la viruta que genera es toxica para el ser humano, por lo cual es aspirada al mismo tiempo que se está realizando el mecanizado.

El objetivo de la viruta es obtener una viruta gruesa en la entrada y delgada a la salida, lo cual nos permitirá obtener un mecanizado estable.

- Sentido de giro
 - Fresado en oposición (up milling)

La dirección de avance de la pieza es opuesta a la de rotación de la fresa en el área del corte.

En el fresado hacia arriba (convencional) el grosor de la viruta empieza desde cero y se va incrementando hasta el final del corte, este movimiento provocará un aumento de la temperatura debido a la fricción, lo que generará que la pieza tienda a desprenderse de la base, provocando que aumenten las vibraciones, reduciendo la calidad final del agujero en la Figura 26 se muestra un esquema del movimiento.

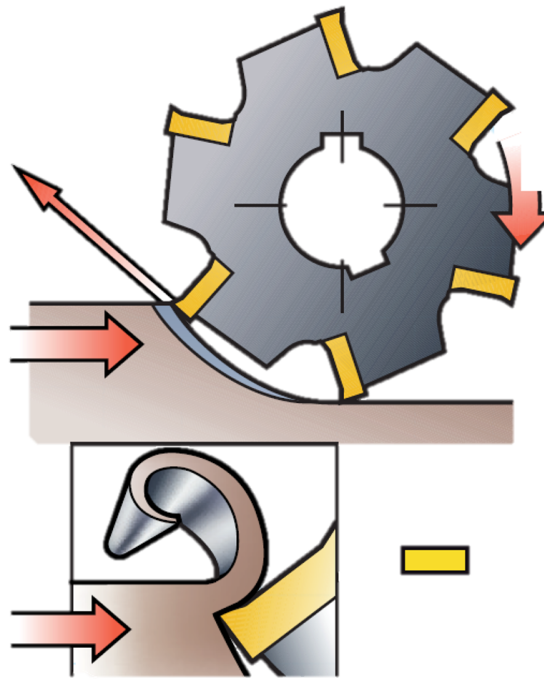


Figura 26: Fresado en oposición (up milling) [11].

- Fresado en concordancia (down milling)

Si se utiliza fresado hacia abajo, se evita el efecto de bruñido, de modo que se produce menos calor y la tendencia al endurecimiento mecánico es mínima.

En el fresado hacia abajo (a favor) la herramienta inicia el corte con un grosor de viruta grande. Esto provocará que la pieza se adhiera contra la base, reduciendo las vibraciones y mejorando la calidad del agujero. La viruta decrecerá desde la entrada de la herramienta hasta su salida en la Figura 27 se muestra un esquema del movimiento [11].

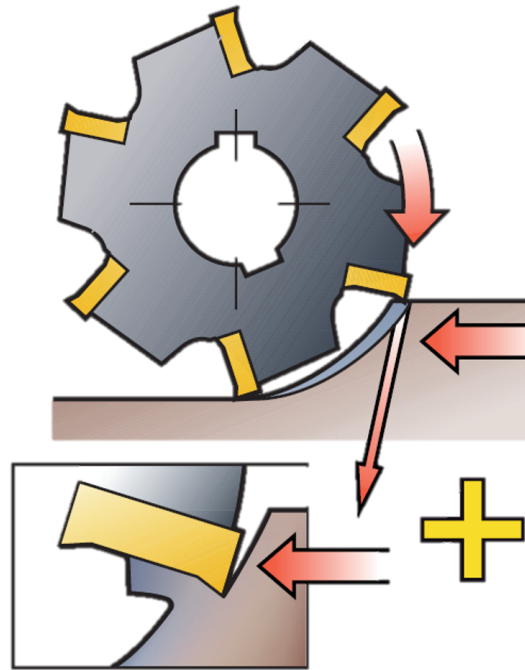


Figura 27: Fresado en concordancia (down milling) [11].

2.2.3.4 Procesos de corte

Los procesos de mecanizado son complejos de analizar debido a la multitud de factores que se encuentran dentro de estos procesos de mecanizado. Para simplificar el análisis de los procesos de mecanizado, se utiliza el llamado Modelo de Corte ortogonal, con el fin de facilitar el estudio de los parámetros y procesos que intervienen dentro del proceso de mecanizado. El trabajo se centrará en el estudio de los cortes oblicuos, ya que son los más comunes en procesos de mecanizado como el fresado helicoidal [16].

En el corte ortogonal, el filo de la herramienta de corte está perpendicular a la dirección de desplazamiento entre herramienta y pieza durante el proceso de corte. En el corte oblicuo el ángulo de inclinación es distinto de 90° , en la Figura 28 se observan los dos procesos de corte descritos [16].

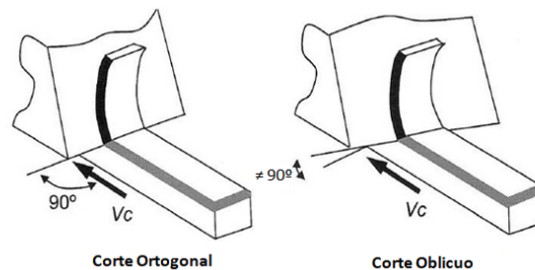


Figura 28: Corte ortogonal y corte oblicuo [16].

Se va a proceder a explicar los diferentes ángulos y parámetros geométricos dentro del proceso de corte, en la Figura 29 se pueden apreciar todos los parámetros geométricos y ángulos que se van a describir a falta de 2 ángulos que se verán en la Figura 30 .

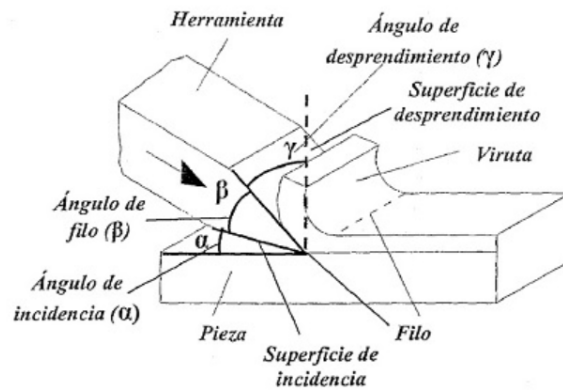


Figura 29: Parámetros geométricos y diferentes ángulos dentro del corte [16].

Como ya se ha indicado, para definir correctamente los ángulos implicados dentro del fresado es necesario la Figura 30, donde se observan los ángulos k'_r (ángulo de posición de filo secundario) y K_r (ángulo de posición de filo principal).

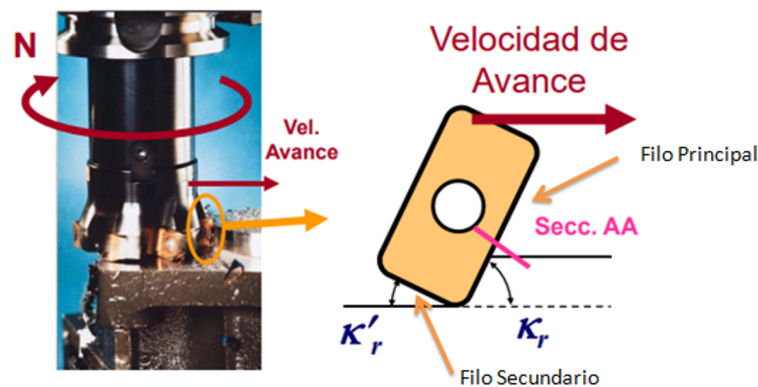


Figura 30: Ángulos de posición [10]

- Ángulo de desprendimiento (γ)

Es el ángulo formado por la superficie de desprendimiento de la herramienta y la dirección perpendicular a la superficie mecanizada de la pieza.

En cortes oblicuos, el ángulo de desprendimiento estará compuesto por una componente axial (γ_a) y otra radial (γ_r), en la Figura 31 se observan estas dos componentes.

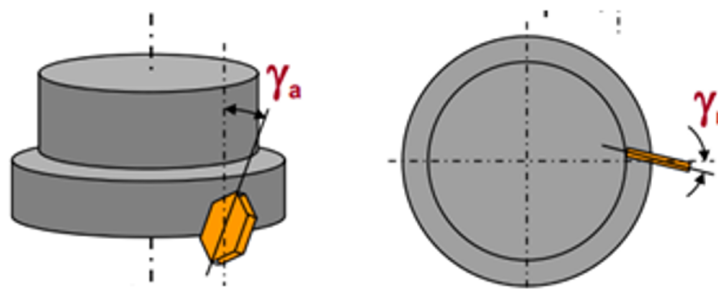


Figura 31: Ángulos de desprendimiento axial y radial [10]

Si el ángulo de desprendimiento es elevado, la herramienta de corte penetra dentro de la pieza, obteniendo un mejor acabado superficial, pero reduciremos el tiempo de vida del filo

de corte. Si el ángulo es pequeño, aumentará la temperatura de la herramienta y la energía consumida, pero se obtendrá una durabilidad de la herramienta. El ángulo de desprendimiento más favorable es aquel que permita tener el mayor ángulo pero sin llegar a romper la herramienta, este ángulo dependerá del material a mecanizar entre otros factores [16].

- Ángulo de incidencia (δ)

Es el ángulo formado por la superficie de incidencia de la herramienta de corte y la superficie de la pieza ya mecanizada.

Si el ángulo de incidencia es muy pequeño, aumentará el contacto entre la pieza y la herramienta, produciéndose un contacto excesivo y como consecuencia, un aumento de la temperatura que producirá un desgaste más rápido de la herramienta, y por tanto, disminuirá su vida útil. Por el contrario, si el valor del ángulo de incidencia es demasiado grande, se debilitaría el filo de la herramienta que afectaría negativamente a su durabilidad. Para conseguir un ángulo de incidencia correcto, habrá que tener en cuenta el material de la pieza y la herramienta [16].

- Ángulo de filo (β)

Es el ángulo formado por las superficies de incidencia y desprendimiento de la herramienta de corte.

- Ángulo de deslizamiento (φ)

Es el ángulo formado por la superficie de la pieza y el plano de deslizamiento, que es un plano teórico en el que se produce la deformación del material de la pieza. El ángulo de deslizamiento es el ángulo según el cual se corta el material para formar la viruta. Su importancia radica en que por debajo de este plano la pieza de trabajo permanece sin deformaciones, y por encima de él la viruta sale recién formada fluyendo sobre la superficie de desprendimiento [16].

- Profundidad de pasada axial (a_p)

Es el espesor del material que va a ser eliminado de la pieza antes de sufrir deformación alguna.

- Espesor de viruta deformada (a_c)

Es el espesor del material eliminado después de haber sufrido la deformación. En el fresado helicoidal, este depende de la posición radial del diente, definida por θ , ver Figura 32 [10].

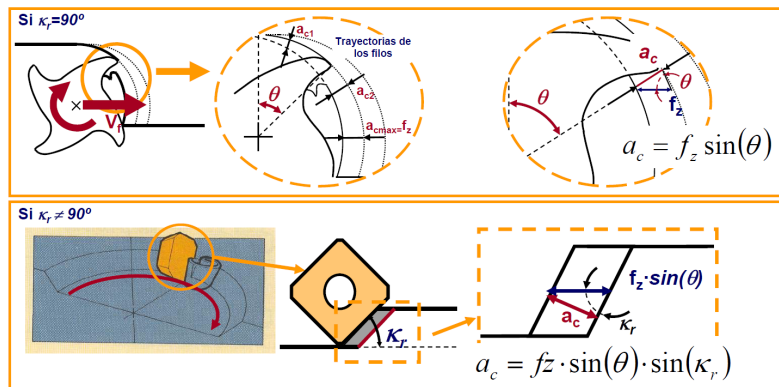


Figura 32: Ángulos de espesor de la viruta [10]

- Factor de recalcado (p)

Es el cociente entre los espesores de viruta deformada y sin deformar. Es siempre mayor o igual que la unidad.

$$p = \frac{a_c}{a_p} \geq 1 \quad (2.21)$$

a_c = Espesor de la viruta deformada (mm)
 a_p = Profundidad de pasada axial (mm)

2.2.3.5 Fuerzas generadas

La fuerza de corte es un parámetro importante, se trata de toda fuerza necesaria para cortar y perfilar una pieza de mecanizado CNC. Es importante definir correctamente la fuerza, ya que como se ha visto en otros artículos, la fuerza de corte afecta a otros parámetros como pueden ser el incremento de la temperatura de la herramienta y la pieza, la calidad final del agujero.

La interacción entre la herramienta, la viruta y la pieza, se traduce en una serie de presiones sobre la superficie de la herramienta. Este sistema de fuerzas y presiones se puede reducir a una fuerza resultante F [85].

Una primera descomposición de esta fuerza es en dos direcciones ortogonales, una en la dirección de la velocidad de corte que será la fuerza de corte F_c , y la otra en la dirección perpendicular a la velocidad de corte que será la fuerza de empuje F_t [85].

La composición de las fuerzas durante el fresado helicoidal es distinta. En este caso la geometría de la viruta no deformada se utiliza para modelar un enfoque semi-analítico [18].

El estudio de la fuerza durante el fresado helicoidal se realizará con los dos sistemas de coordenadas explicados anteriormente:

- Sistema de coordenadas de la pieza.
- Sistema de coordenadas de la herramienta.

En este estudio, las fuerzas que se van a analizar son las de la pieza, ya que son componentes ortogonales F_x , F_y y F_z y se pueden monitorizar con un dinamómetro estacionario, este procedimiento será explicado más adelante en la Metodología.

Por otro lado se tiene el sistemas de coordenadas de la herramienta, existe cierta discrepancia en este sistema de coordenadas, dependiendo del articulo que se lea. En este trabajo vamos a utilizar uno de los sistemas de coordenadas de la herramienta más extendido. La fuerza tangencial (F_t) se sitúa en dirección opuesta a la dirección de corte, la fuerza radial (F_r) actúa hacia el centro de la herramienta y por último la fuerza axial (F_a) a lo largo del eje z, ver la Figura 33 donde se sitúan las fuerzas explicadas, en la figura (a) se representan las fuerzas de la pieza y en la figura (b) se representan las fuerzas de la herramienta [72].

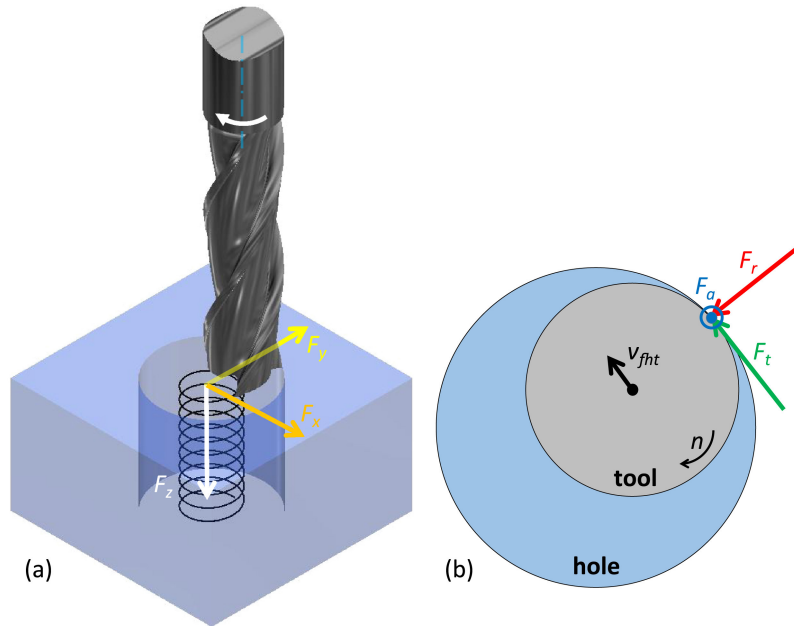


Figura 33: Fuerzas fresado helicoidal [17, 18]

Como se puede observar en la Figura 33, la fuerza en z (F_z) de la pieza es igual que la fuerza axial (F_a) de la herramienta, $F_z = F_a$. Además existe una relación entre la fuerza radial (F_r) de la herramienta y la fuerza x e y de la pieza (F_x, F_y).

$$F_r = \sqrt{F_x + F_y} \quad (2.22)$$

La fuerza radial (F_r) también es conocida como fuerza normal de avance (F_{fN}) y la fuerza tangencial (F_t) también se puede denominar fuerza de avance (F_f) [72].

■ Modelos de fuerza de corte

A continuación se van a desarrollar varios modelos utilizados para el fresado helicoidal en diferentes investigaciones:

- El primer modelo que se va a presentar esta basado en la fuerza de corte (F_c) del polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP). Este modelo utiliza el ángulo de corte de la fibra basado en el principio de corte del fresado helicoidal. Los parámetros de corte no lineales los predijeron utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM). El modelo presentó un 15 % de error con respecto a los ensayos realizados para su validación [86].
- El segundo modelo, los investigadores, utilizan la fuerza de corte dinámica. Lo cual implica que el mecanismo de corte y la fuerza de corte tanto en el borde de corte periférico como en el frontal se utilizan de manera simultanea. En este modelo, se realizaron diferentes pruebas en el Al 7075-T6, para analizar el efecto de la fuerza tangencial (F_t) y la fuerza axial (F_a) en los componentes de la fuerza de corte en el sistema de coordenadas de la pieza [83, 87].
- El tercer modelo que se va a presentar es uno de los más realizado por los investigadores, este modelo consiste en la predicción de la fuerza axial crítica que causaría el inicio de la propagación de las grietas y la delaminación durante el fresado helicoidal. Este modelo concreto que el riesgo de delaminación a la salida en CFRP se reduciría con la herramienta del fresado helicoidal, debido a la distribución de la carga axial, ver Figura 34 donde se compara la salida de una herramienta de taladrado con una de fresado helicoidal.

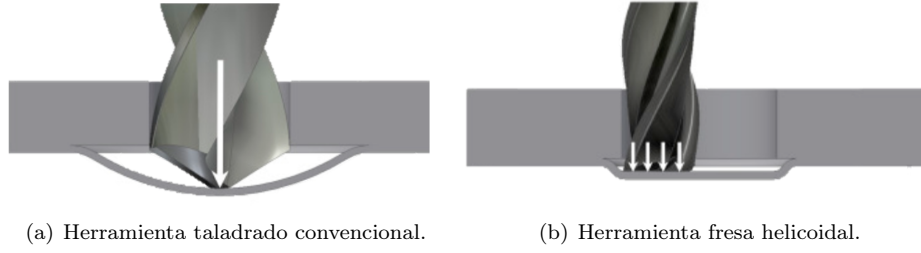
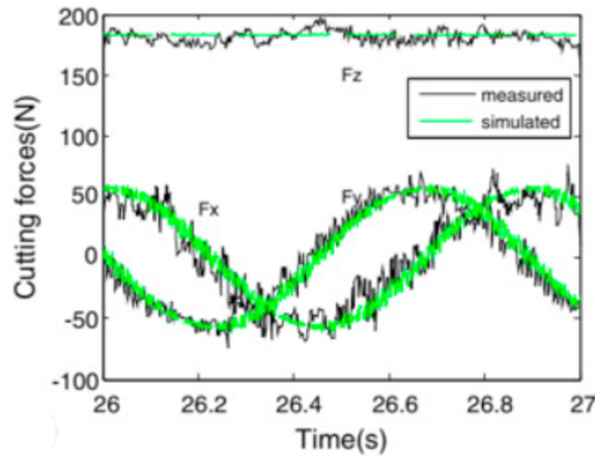
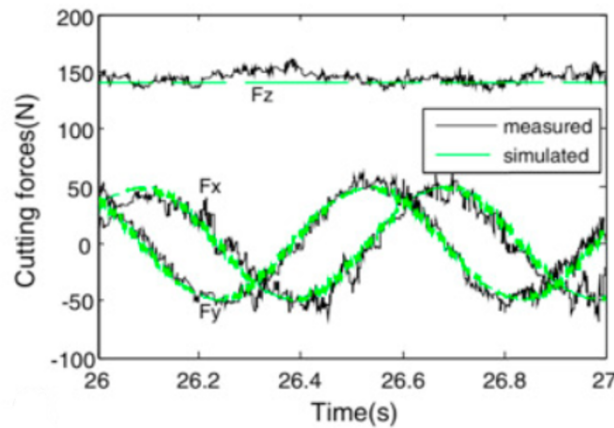


Figura 34: Distribución fuerza axial en la salida de una probeta de CFRP [19]

- En el cuarto modelo, se comparan las fuerzas de corte simuladas con las medidas en Ti6Al4V, presentando un 10 % de error en las fuerzas medidas con respecto a las simuladas, el autor asegura que este error se debe a una interferencia a la hora de la toma de las medidas. Para la simulación, este autor indico varias suposiciones como que no existe deflexión ni vibración de la herramienta o que la herramienta y la pieza de trabajo es rígida, en la Figura 35 se observa los valores de fuerza medidos en la simulación con respecto a los medidos en el ensayo [20], el software utilizado para el análisis de las fuerzas es OriginPro [88].



(a) $N = 3200$ (rev/min), $f_z = 0.05$ (mm/diente), $a_p = 0.2$ (mm/rev).



(b) $N = 3700$ (rev/min), $f_z = 0.065$ (mm/diente), $a_p = 0.1$ (mm/rev).

Figura 35: Comparación de las fuerzas medidas y simuladas [20].

2.2.3.6 Artículos revisados

Tras el estudio realizado de diferentes artículos científicos en la web sciencedirect [89], se ha obtenido las siguientes Tablas 1, 2.

Tabla 1: Calidad artículos estudiados, 1 [34], 2 [35], 3 [36], 4 [37], 5 [38], 6 [39].

Ref. Review	Diámetro	microestructura	Temperatura	Ensayo	Material
1	x	x	x	x	STACK (Ti6Al4V/CFRP)
2	x	-	x	x	Ti6Al4V
3	-	-	x	x	CFRP
4	x	x	x	x	STACK (Ti6Al4V/CFRP)
5	x	-	-	x	CFRP
6	-	x	-	x	CFRP y GFRP

Tabla 2: Fuerzas articulos estudiados, 1 [34], 2 [35], 3 [36], 4 [37], 5 [38], 6 [39].

Ref. Review	Fuerza	Fz	Calidad/Fuerza	Maquina	Amplificador	Software
1	x	x	x	Kistler 9257B	Kistler 5070	DynoWare
2	x	-	x	Kistler 9272	-	-
3	x	x	-	Kistler 9257B	-	-
4	x	x	x	Kistler 9257A	Kistler 5070A	-
5	x	x	x	Kistler 9257B	-	Minitab Y EXCEL
6	x	x	x	Kistler 9257A	-	Minitab

En estos artículos, se ha encontrado un creciente interés por el estudio de las fuerzas generadas durante el fresado helicoidal. Algunos artículos intentan relacionar estas fuerzas generadas con la calidad del agujero, pero sin llegar a encontrar una clara relación. El parámetro más estudiado es el diámetro.

Para la obtención de los valores de fuerzas generados durante el fresado normalmente usan una mesa dinamométrica de la marca Kistler [90]. El software que usan para el tratamiento de estos datos es un software específico como es Minitab [24]. En estos artículos uno de los mayores inconvenientes encontrados, es que no especifican una metodología de trabajo que seguir para el análisis de las fuerzas, o en algunos casos falta de ensayos para poder llegar a más conclusiones, no obstante han servido para aprender y corroborar algunos de los resultados obtenidos.

Los investigadores centran su estudio en materiales de interés aeroespacial como puede ser el Ti6Al4V o las CFRP. Por otro lado se puede observar que la tendencia es a la realización de los agujeros sin lubricación es decir en seco, siendo un proceso más sostenible.

2.3. Calidad agujero

El tema principal de este trabajo es el análisis de las fuerzas generadas durante el fresado helicoidal, pero es importante también el estudio de la calidad de los agujeros realizados, ya que este análisis permitirá intentar buscar una relación entre las fuerzas generadas y la calidad.

La calidad de los agujeros es muy importante dentro de la industria aeroespacial, ya que los requisitos son muy exigentes. Por ejemplo, el error de redondez debe de ser inferior que $26.0 \mu\text{m}$, el error de posición menor de 0.5mm y la desviación perpendicular inferior a 0.5° [91].

El estudio se centrará en la calidad del agujero, diámetro, rugosidad y rebabas.

2.3.1. Diámetro

El diámetro es considerado una defectología dimensional, debido a que el diámetro es analizado mediante la medición de diámetros.

El diámetro es una de las principales defectologías, ya que se busca obtener experimentalmente el diámetro teórico calculado.

Existen diversas manera de medir el diámetro del agujero, desde equipos sin contacto hasta micrómetros de interiores en la Figura 36 se puede observar un ejemplo de micrómetro.



Figura 36: Micrómetro de interiores

El diámetro teórico utilizado es 6.35 mm tanto para el titanio como para CFRP.

2.3.2. Rugosidad

La rugosidad ó textura primaria, está formada por surcos o marcas dejadas por los agentes que atacan la superficie en el proceso de mecanizado (herramienta, partículas abrasivas, acción química, etc.) y se encuentra superpuesta al perfil de ondulación. Los espacios entre crestas varían entre 4 y 50 veces la profundidad de la depresión [21].

La definición de medición de textura superficial se realiza en forma geométrica, ante la imposibilidad de una definición funcional. Las definiciones geométricas son bastante abstractas porque están basadas en una línea de referencia que existe solamente en teoría. Los resultados incluso sufren ciertas distorsiones por la utilización de filtros para excluir la ondulación cuando se pretende definir la rugosidad [21].

Fueron desarrollados dos sistemas de referencia: El sistema “E” o de la envolvente y el sistema “M” o de la línea media.

El sistema que se utiliza para analizar la rugosidad superficial del material es el rugosímetro. El sistema utilizado en este estudio es el “M”.

En el sistema M, la línea de referencia utilizada es la Línea Media, que se define como la línea localizada en la parte media del perfil de rugosidad, con la misma forma que el perfil geométrico, dispuesta paralela a la dirección general del perfil, dentro de los límites comprendidos como base de medición, de modo que la suma de las áreas por encima de ella sean exactamente iguales a la suma de las áreas que están por debajo, en la Figura 37 se muestra la línea media [21].

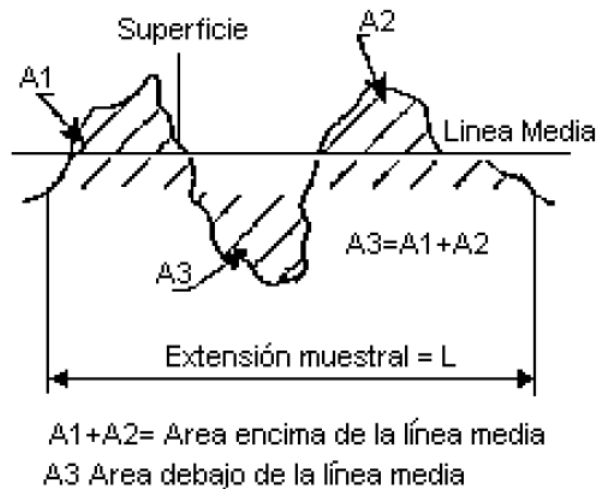


Figura 37: Superficie y línea media [21]

Existen diferentes tipos de parámetros para valorar la rugosidad pero los más extendidos son R_a (Rugosidad media aritmética) y R_z (Rugosidad media).

Las normas de rugosidad son DIN 4762, DIN 4768 y DIN 4771, DIN 4775; y el alcance de la rugosidad de superficies se encuentra en la norma DIN 4766-1 [21].

2.3.3. Rebaba

Dentro de la industria aeroespacial no se puede permitir la formación de rebabas en los agujeros, debido a que genera un riesgo de corrosión y avería eléctrica. Es por eso que cuando se generan se necesitan dos pasos de trabajo más en el ensamblaje para eliminar las rebabas, por lo cual iría en contra de la tendencia actual del one way assembly y one-shoot drilling [92].

Este defecto se produce tanto a la entrada como a la salida del agujero. esto es debido a que existe un frente de calor que se acumula delante de la broca, reblandeciendo localmente el material, lo que unido a los esfuerzos axiales producidos por la herramienta produce la deformación plástica del material, formando una deformación de material no mecanizado o rebaba [44].

2.4. Materiales Utilizados

2.4.1. Fibra de Carbono

Actualmente la fibra de carbono es un material muy apreciado en las industrias espacial, aeronáutica y automovilística debido a sus sorprendentes propiedades mecánicas y su ligereza. El físico Roger Bacon en 1958 consiguió apuntalar la tecnología para la obtención posterior de este material [93].

El tejido de fibras de carbono procede de una mezcla de polímeros. El proceso de obtención más famoso es el poliacrilonitrilo (PAN) [94].

El carbono forma parte de toda la química orgánica y de 20 millones de moléculas conocidas, es un elemento esencial para la vida y la evolución. También es un elemento alotrópico, es decir, que cuando se encuentra en estado puro, enlaza entre sí sus átomos de diferentes maneras y por ello puede presentarse en diversas formas: grafito, diamante o fulerenos, en todos estos casos la composición química es idéntica, carbono puro, pero varía la forma en la que se distribuyen los átomos en cada estructura. El carbono se puede combinar con muchos elementos como: nitrógeno (N), azufre (S), oxígeno (O), cloro (Cl), bromo (Br) y fósforo (P) que son estables termodinámicamente, y con otros átomos de carbono, haciendo parte de la composición de todos los materiales en la tierra, en mayor o menor medida. Desde los más blandos hasta los más duros y resistentes [95].

Consiste en una fibra de plástico formada por largas cadenas de moléculas de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógenos en forma de escalera. Al calentar a la correcta temperatura el PAN, las cadenas de carbono se juntan mientras que el resto de los elementos se separan. De esta forma, los átomos de carbono modifican su distribución, formando una estructura estable de anillos que soportan unos a los otros. Posteriormente se vuelve a realizar un calentamiento, produciendo que los anillos se junten formando "listones" de hexágonos de átomos de carbono muy flexibles [96,97].

Hay dos tipos de fibras de carbono: de alto módulo de elasticidad (AM) es de 300 GPa y su módulo de resistencia a la tracción es de 700 MPa., y de alta resistencia (AR) es de 140 GPa y su resistencia a la tracción es de 1.500 MPa [98].

En resumen, la producción de fibra de carbono consiste en la quema controlada del oxígeno, nitrógeno y otros elementos de la fibra precursora, consiguiendo dejar solo el carbono en el material [99].

Las fibras de carbono se suelen clasificar atendiendo principalmente a dos criterios: tipo de precursor, mencionado anteriormente, y valor de su módulo de elasticidad. En cuanto al segundo criterio se pueden distinguir cinco clases o calidades de fibras [100]:

- Fibras de ultra alto módulo (UHM): Son aquellas que presentan un módulo elástico superior a los 500 GPa.
- Fibras de alto módulo (HM). Presentan un módulo de elasticidad superior a 300 GPa, pero con una relación resistencia a la tracción/módulo de tensión menor del 1 %.
- Fibras de alta fuerza (HT). Presentan valores de resistencia a la tensión superiores a 3 GPa y con relaciones resistencia a la tracción/módulo de 0.015-20.
- Fibras de módulo intermedio (IM). Presentan valores del módulo de tensión superiores a 300 GPa y relaciones de resistencia a la tracción/módulo del orden de 0,01.

Las principales características de las fibras de carbono son [100]:

- Alta resistencia específica.
- Alto módulo específico.
- Baja densidad.
- No presenta plasticidad, el límite de rotura coincide con el límite elástico.
- Buena resistencia a disolventes orgánicos.
- Buena conductividad térmica y eléctrica.
- Coeficiente de dilatación térmica lineal prácticamente nulo.
- Elevada resistencia a altas temperaturas.

2.4.1.1 CFRP

Los compuestos poliméricos reforzados con fibra de carbono CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) son materiales ligeros y resistentes que se utilizan en la fabricación de numerosos productos utilizados en nuestra vida diaria. Es un término utilizado para describir un material compuesto por dos o más elementos y que al combinarlos dan una respuesta estructural atractiva al sector industrial, esta reforzado con fibra que utiliza fibra de carbono como componente estructural principal .

Los CFRP combinan unas propiedades muy atractivas para el sector aeronáutico y aeroespacial, ya que presentan una buena resistencia frente a la fatiga y la corrosión, a la vez que poco peso y una rigidez específica alta [101].

No podemos olvidar que tiene un alto costo y una conductividad excesiva, que en determinadas aplicaciones no resulta favorable.

También contienen otros componentes, como cargas y aditivos, que le otorgan características peculiares para cada tipo de fabricación. Para poder limitar el concepto de material compuesto en función de su estructura, fabricación y comportamiento, estos materiales deben cumplir los siguientes puntos [102]:

- Está fabricado de forma artificial.
- Está formado por dos o más fases químicamente diferentes, dispuestas de forma adecuada y separadas por una intercara definida.
- Sus propiedades no pueden ser alcanzadas por ninguno de sus constituyentes de forma aislada.

2.4.1.2 Composición y clasificación

Los elementos principales que presentan los materiales compuestos son refuerzo y matriz. Con una adecuada mezcla de dichos elementos, conseguimos materiales con propiedades superiores a las que tienen individualmente.

- Fase discontinua. Refuerzo: Inmerso en la matriz, proporciona la resistencia y rigidez al material, ya que soporta la mayor parte de la fuerza aplicada [102, 103].
- Fase continua. Matriz: Proporciona cohesión a la fase discontinua y transmite las cargas aplicadas al material. A su vez, protegen al refuerzo del daño mecánico y de agentes externos [104].

Los materiales compuestos más utilizados son los de matriz orgánica y refuerzos en forma de fibras. Una buena adherencia entre la matriz y el refuerzo debe dar estabilidad al conjunto, transfiriendo las cargas al refuerzo, proteger al refuerzo del deterioro mecánico y químico y evitar la propagación de grietas. Las matrices orgánica más vulgarmente conocidas como plásticos pueden ser: Termoplásticos, Elastómeros, Duroplásticos, Epoxis, Bismaleimidas, Poliamidas, Fenolicas, Poliésteres, Cianoesteres. Las conocidas como fibras:

- Una primera clasificación es la que analiza el tipo de matriz, distinguiéndose los siguientes tipos [105]:
 - Materiales compuestos de matriz METÁLICA o MMC (METAL MATRIX COMPOSITES).
 - Materiales compuestos de matriz CERÁMICA o CMC (CERAMIC MATRIX COMPOSITES).
 - Materiales compuestos de matriz de CARBÓN.
 - Materiales compuestos de matriz ORGÁNICA o RP (REINFORCED PLASTICS) y dentro de estos, son los más utilizados:
 - CFRP (CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS) o materiales compuestos de fibra de carbono con matriz orgánica.
 - GFRP (GLASS FIBER REINFORCED PLASTICS) o materiales compuestos de fibra de vidrio con matriz orgánica.
- En lo que a los refuerzos se refiere, los hay de dos tipos [99, 105]:
 - FIBRAS, elementos en forma de hilo en las que la relación $L/D > 100$. Fibras de: Vidrio, E, S, C, M, D, Carbono, Cerámicas, Orgánicas, Kevlar, Boro, Metálicas.
 - CARGAS, el resto, utilizadas en elementos de poca responsabilidad estructural.

2.4.2. Aleaciones de Titanio

El titanio es un metal muy importante de la corteza terrestre, supone un 1 % de la misma, lo que lo hace el cuarto metal más abundante y que ocupe el noveno dentro de los metales industriales, fue descubierto en 1791. El titanio en su forma natural es sólido. Es un elemento químico de aspecto plateado y pertenece al grupo de los metales de transición. Su número atómico es 22. Su oxidación El símbolo químico es Ti. Su punto de fusión es de 1941 grados Kelvin o de 1668,85 grados celsius

o grados centígrados. El punto de ebullición del titanio es de 3.560 grados Kelvin o de 3.287,85 grados celsius o grados centígrados [106].

Es más ligero y caro que el acero, con quien compite en aplicaciones técnicas, tiene alta resistencia a la corrosión y gran resistencia mecánica. Las aleaciones de titanio son muy utilizados en el sector de construcción aeroespacial, debido a la buena relación que tiene de resistencia/peso y soportar temperaturas extremas de la atmósfera [106, 107].

Los factores que hacen que las aleaciones de titanio sean un desafío para el mecanizado y que contribuyan a su baja potencia de maquinabilidad son su conductividad térmica, alta adherencia y tensión, y su alta tensión en temple, hay que intentar mantener su integridad estructural al cortarlo. Tiene un bajo módulo elástico. Las aleaciones de titanio tienen una baja conductividad térmica, lo que significa que en el proceso de mecanizado, el calor generado por el proceso se transfiere a la fresa en lugar de alejarse de la zona de corte con las virutas [108].

Pautas para mecanizar correctamente el titanio:

- Utilizar velocidades de corte relativamente bajas.
- Utilizar bordes de corte afilados.
- Optimizar las velocidades de avance.
- Usar grandes volúmenes de líquido refrigerante, preferiblemente a alta presión, a través de la herramienta.
- Reemplazar la herramienta de corte ante el primer signo de cualquier desgaste.
- Emplear el método de concordancia, siempre que sea posible [109].

2.4.2.1 Ti6Al4V / UNS R56400

El titanio 6Al-4V (UNS R56400) es una de las aleaciones de titanio más utilizado. Es una aleación de dos fases $\alpha + \beta$, con el aluminio como estabilizador alfa y el vanadio como estabilizador beta, siendo los más usados los de grado: 5, 23 y 29, la variedad de grados está relacionada con la cantidad de oxígeno. Esta aleación puede ser bien soldada, tiene alta tenacidad. de alta resistencia puede ser utilizada en criogénicos con temperaturas de hasta aproximadamente 800 ° F (427 °C) [110].

La resistencia a la corrosión de Titanio 6Al-4V se basa en la existencia de una capa de óxido que se forma espontáneamente tras la exposición al oxígeno. Tiene una excelente resistencia a la corrosión en el agua de mar, por lo que es una buena opción para su uso en operaciones de petróleo y gas submarinas. Sin embargo puede ser atacado rápidamente por entornos que causan la ruptura de la capa de óxido protectora que incluye ácidos fluorhídricos (HF), clorhídrico (HCl), sulfúrico y fosfórico .

La composición y las propiedades de la aleación quedan definidas en las Tablas 3, 4.

Tabla 3: Composición Ti6Al4V [40]

Elementos	Composición
Aluminio, Al	$\leq 6.500 \%$
Carbono, C	$\leq 0.080 \%$
Hidrógeno, H	$\leq 0.015 \%$
Hierro, Fe	$\leq 0.300 \%$
Nitrógeno, N	$\leq 0.0500 \%$
Oxígeno, O	$\leq 0.200 \%$
Titanio, Ti	90.000 %
Vanadio, V	4.000 %

Tabla 4: Propiedades Ti6Al4V [40]

Propiedades Físicas	
Densidad	4.43 g/cc
Propiedades Mecánicas	
Dureza Rockwell C	35
Resistencia a la Tracción, Definitiva	895 MPa
Resistencia a la Tracción, Rendimiento	828 MPa

La resistencia a la corrosión, a temperaturas extremas y bajo peso; lo hacen un material ideal. En la industrial aeroespacial, como inconveniente el coste del mismo. Gracias a estas cualidades del material, es el motivo del presente estudio y de su idoneidad para el fresado helicoidal.

Las aleaciones de titanio se suelen utilizar para piezas que requieren una mayor fiabilidad (sector aeronáutico y características específicas en su comportamiento a la fatiga), y por tanto la rugosidad de la superficie y cualquier daño en las capas superficiales debe ser controlado. Otro de los grandes motivos que llevan a optar por el fresado helicoidal a la hora de su mecanizado, ya que este como se ha indicado anteriormente mejora considerablemente el acabado superficial de las piezas que se mecanizan [22].

Esta aleación de titanio particularmente está caracterizada por su tendencia a generar virutas segmentadas, como se observa en la Figura 38. Las deformaciones en las virutas aparecen incluso a velocidades de corte muy bajas. Esto es debido a la baja difusividad térmica del material.

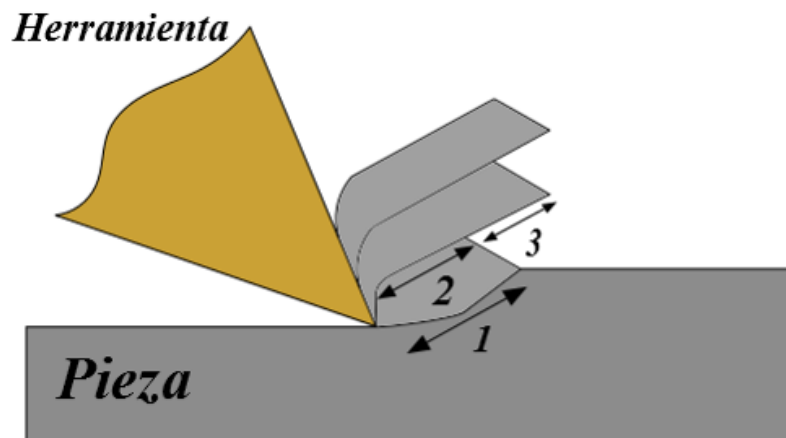


Figura 38: Segmentación de viruta en la aleación [22]

3. Metodología

3.1. Planificación del ensayo

El objetivo es realizar una correcta metodología de trabajo con la cual ser capaz de estudiar las fuerzas generadas durante el fresado helicoidal.

Dicha propuesta metodológica partirá de la base de conocimientos e información que durante los capítulos anteriores se han expuesto y la cual tiene una importante base en trabajos de investigación sobre fresado helicoidal.

Se ha realizado un diagrama en el que se muestran los pasos que se han seguido para su proposición Figura 39.

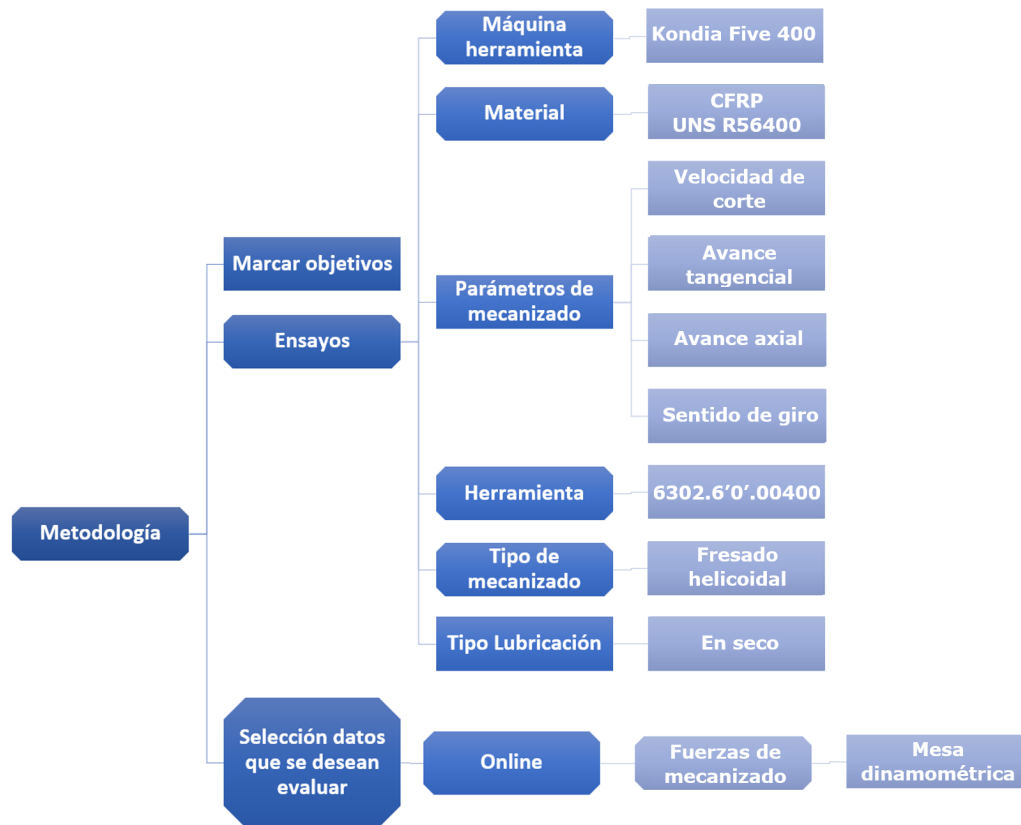


Figura 39: Diagrama para la propuesta metodológica.

3.2. Herramienta

La herramienta utilizada para el mecanizado es del fabricante Kendu [23]. En la Figura 40 se puede observar el catalogo ofrecido por Kendu, donde se observan dos herramientas la 6302.67. y la 6302.62.

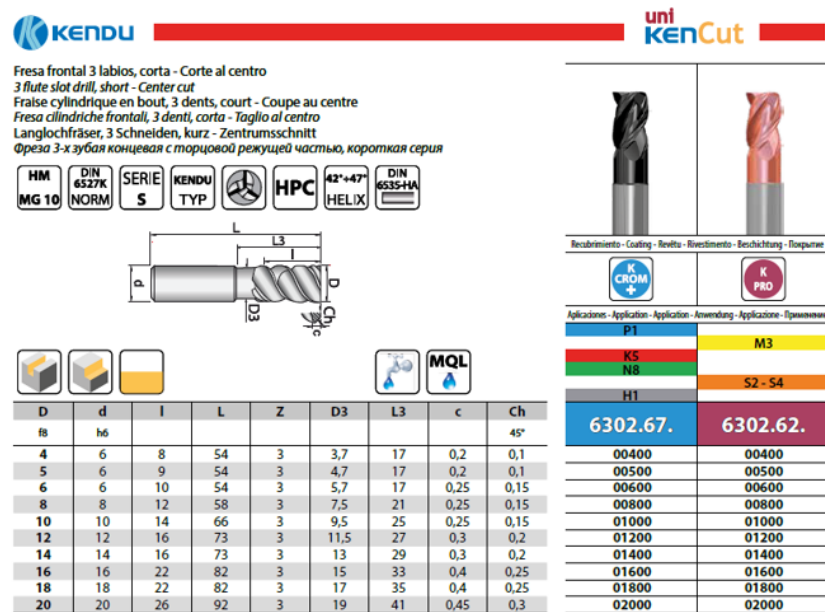


Figura 40: Catálogo herramienta Kendu 6302 [23]

La terminación de la herramienta hace referencia al tipo de recubrimiento, en este estudio la herramienta no tiene recubrimiento por lo cual el modelo es 6302.6'0'.00400, los parámetros de la herramienta son los mismos, la única diferencia es que no tiene recubrimiento. Las principales características de esta herramienta son:

- Diámetro de la herramienta (D_t) = 4 mm.
- Número de dientes (z) = 3.
- Material de la herramienta: HM MG 10, correspondiente a un metal duro microgramo 10 % Co.
- Fabricado bajo la norma DIN 6527L.
- Geometría de hélice de filo de corte.
- Valorada como HPC, computación de alto rendimiento.
- Ángulo de hélice: $42^\circ \div 47^\circ$.

La herramienta pertenece al tipo K-PRO lo que le otorga unas características específicas :

- Extrema resistencia a las tensiones.
- Alta resistencia al desgaste en caliente.
- Mecanizado en seco.
- Estructura monocapa, especial para el mecanizado extraduro.

Se ha buscado una herramienta que fuera óptima para el mecanizado de materiales duros y difíciles de mecanizar como es el Titanio y la CFRP.

Posteriormente se ha procedido a analizar la herramienta suministrada por el fabricante, para comprobar que no existieran irregularidades.

Finalmente se indicarán todos los diámetros en la Tabla 5.

Tabla 5: Diámetros

Parámetros	Diámetro(mm)
Hélice (D_h)	2.35
Herramienta (D_t)	4.00
Agujero (D_b)	6.35

3.3. Estudio estadístico

Para la realización de los ensayos, se han realizado mediante un estudio estadístico. El estudio estadístico permite reducir al mínimo el número de ensayos a realizar consiguiendo un ahorro en el tiempo y en el coste.

El modelo estadístico elegido para este estudio ha sido la fracción factorial, la cual permite estudiar los diferentes factores que influyen en el ensayo. Mediante la fracción factorial se puede estudiar la interacción que tienen estos factores, sin la necesidad de realizar una gran cantidad de ensayos.

El software con el cual se va a realizar este estudio es Minitab, software que hemos visto utilizado en otros artículos como [38]. Este software nos permite la realización de dos tipos de diseños factoriales :

■ Diseños factoriales completos

El diseño factorial completo mide todas las respuestas para todas las combinaciones de niveles de los factores, además el software Minitab nos ofrece la posibilidad de estudiar dos tipos de diseños factoriales completos:

- De 2 niveles: El cual solo tiene factores de 2 niveles.
- Completo general: El cual tiene los factores con más de 2 niveles.

El número de corridas necesarias en el de 2 niveles es 2^k , donde k es el número de factores. A medida que aumenta el número de factores incluidos en un diseño factorial de 2 niveles, el número de corridas necesarias para realizar un diseño factorial completo aumenta rápidamente.

Cada corrida hace referencia al número de ensayos que hay que realizar, variando los factores de este según indique el diseño factorial elegido.

■ Diseños factoriales fraccionados

Un diseño fraccionado es un diseño en el cual solo se realizan un subconjunto seleccionado o “fracción” de las corridas experimentales incluidas en el diseño factorial completo. Esta es una opción adecuada con los recursos son limitados o el número de factores es muy grande, ya que se utilizan menos corridas que en diseño factorial completo [111].

Finalmente se ha elegido un diseño factorial fraccionado, debido a los beneficios ya descritos anteriormente. En la Figura 41 se puede observar los distintos números de factores y cuantas corridas le corresponderían según el tipo de diseño que se utilice.

	Factores														
Corri	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Com	III													
8		Com	IV	III	III	III									
16			Com	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III	
32				Com	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Com	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
128						Com	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	

Diseños de Plackett-Burman de resolución III disponibles

Factores	Corridas	Factores	Corridas	Factores	Corridas
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

Figura 41: Diseños factoriales disponibles en Minitab [24]

Como se puede observar en la Figura, en este estudio se tienen 4 factores por lo cual se tendrían que hacer 8 corridas en caso de que se realice un diseño factorial fraccionado y 16 corridas en caso de que sea un diseño factorial completo.

Como se ha indicado anteriormente se realizarán 8 corridas según indica el diseño factorial, además se añadirá el punto intermedio el cual añade 2 corridas más. En total el estudio se realizará con 10 corridas. Para evitar errores y observar la evolución de la calidad en los agujeros se realizarán 3 corridas por cada corrida, obteniendo un total de 30 corridas en la primera fase del Titanio. En CFRP se realizarán 10 corridas por cada corrida, obteniendo un total de 100 corridas.

3.3.1. Titanio UNS R56400

La nomenclatura utilizada para definir los ensayos esta diseñada de la siguiente forma :

- $N^{\circ}Herramienta_N^{\circ}Probeta_Material_Vc_f_{zt}(\mu m/diente)_f_{za}(\mu m/diente)_SentidoGiro$

Tabla 6: Nomenclatura primera corrida Titanio, se repite 2 veces más

Orden Corrida	Codificación
1	1_1HM_Ti_80_15_0,5_C
2	2_1HM_Ti_160_15_0,5_O
3	3_1HM_Ti_80_30_0,5_O
4	4_1HM_Ti_160_30_0,5_C
5	5_1HM_Ti_80_15_1_O
6	6_1HM_Ti_160_15_1_C
7	7_1HM_Ti_80_30_1_C
8	8_1HM_Ti_160_30_1_O
9	9_1HM_Ti_120_22,5_0,75_C
10	10_1HM_Ti_120_22,5_0,75_O

Después de finalizar esta primera fase, se realizo una 2 fase, repitiendo todos las corridas realizadas en oposición para poder realizarlas de nuevo en concordancia, también se repitieron las corridas 6, debido a un problema en la primera fase, en total se realizaron 14 corridas más. Finalmente se realizo un ensayo de vida de la herramienta, con los datos de la corrida 5, realizando un total de 72 corridas más.

3.3.2. CFRP

La nomenclatura utilizada para definir los ensayos esta diseñada de la siguiente forma :

- $N^{\circ}Herramienta_N^{\circ}Probeta_Material_V_c_f_{zt}(\mu m/diente)_f_{za}(\mu m/diente)_SentidoGiro$

Tabla 7: Nomenclatura primera corrida CFRP, se repite 9 veces más

Orden Corrida	Codificación
1	1_1HM_CFRP_75_30_3_C
2	2_1HM_CFRP_150_30_3_O
3	3_1HM_CFRP_75_60_3_O
4	4_1HM_CFRP_150_60_3_C
5	5_1HM_CFRP_75_30_6_O
6	6_1HM_CFRP_150_30_6_C
7	7_1HM_CFRP_75_60_6_C
8	8_1HM_CFRP_150_60_6_O
9	9_1HM_CFRP_112.5_45_4.5_C
10	10_1HM_CFRP_112.5_45_4.5_O

3.4. Elección parámetros de corte

Los parámetros que se van a modificar en este estudio son 4: V_c , f_t , f_a y sentido de giro. Tanto como para CFRP como para la aleación de Titanio (UNS R56400).

3.4.1. Parámetros Titanio (UNS R56400)

3.4.1.1 Velocidad de corte (V_c)

En la Tabla 8 se muestran los parámetros de corte recomendados por el fabricante dependiendo de la operación que se vaya a realizar.

Tabla 8: Parámetros fabricante V_c (m/min) para Titanio (UNS R56400)

Parámetros	Mínimo	Máximo
Ranurado	80	160
Recantado	110	240

Las velocidades de corte elegidas para este estudio son las que se pueden ver en la Tabla 9.

Tabla 9: Parámetros V_c para Titanio (UNS R56400)

Parámetros	Mínimo	Máximo
V_c (m/min)	80	160
rpm	6366	12732

También se ha realizado un ensayo con los parámetros intermedios como nos indica el diseño factorial seguido en la realización de los ensayos, ver Tabla 10.

3.4.1.2 Avance tangencial (f_t)

Uno de los parámetros más importantes dentro del fresado helicoidal, ya que nos permite definir la trayectoria que va a realizar la herramienta, a continuación, se van a mostrar los valores

Tabla 10: Parámetros intermedios V_c para Titanio (UNS R56400)

Parámetros	Intermedio
$V_c(\text{m/min})$	120
rpm	9549

recomendados por el fabricante, ver Tabla 11.

Tabla 11: Parámetros fabricante f_{zt} (mm/z) para Titanio (UNS R56400)

Parámetros	Mínimo	Máximo
Ranurado	0.013	0.018
Recantado	0.019	0.047

Las velocidades de avance tangencial elegidas para este estudio son las que se pueden ver en la Tabla 12.

Tabla 12: Parámetros f_t para Titanio (UNS R56400)

Parámetros	Mínimo	Máximo
Avance tangencial $f_t(\text{mm/rev})$	0.045	0.090
Avance tangencial por diente $f_{zt}(\text{mm/z})$	0.015	0.030
Velocidad avance tangencial $V_{ft}(\text{mm/min})$	106.020	424.080

También se ha realizado un ensayo con los parámetros intermedios como nos indica el modelo factorial seguido en la realización de los ensayos, ver Tabla 13.

Tabla 13: Parámetros intermedios f_t para Titanio (UNS R56400)

Parámetros	Intermedio
Avance tangencial $f_t(\text{mm/rev})$	0.0675
Avance tangencial por diente $f_{zt}(\text{mm/z})$	0.0225
Velocidad avance tangencial $V_{ft}(\text{mm/min})$	238.5400

3.4.1.3 Avance axial (f_a)

De igual forma que el avance tangencial, el avance axial tiene mucha importancia dentro del fresado helicoidal, de igual forma que en el resto de los casos primero vamos a mostrar los parámetros recomendados por el fabricante, ver Tabla 14.

Tabla 14: Parámetros fabricante f_{za} (mm/z) para Titanio (UNS R56400)

Parámetros	Mínimo	Máximo
Ranurado	0.013	0.018
Recantado	0.019	0.047

Las velocidades de avance axial elegidas para este estudio son las que se pueden ver en la Tabla 15.

Tabla 15: Parámetros f_a para Titanio (UNS R56400)

Parámetros	Mínimo	Máximo
Avance tangencial f_a (mm/rev)	0.0015	0.0030
Avance tangencial por diente f_{za} (mm/z)	0.0005	0.0010
Velocidad avance tangencial V_{fa} (mm/min)	9.5000	38.2000

También se ha realizado un ensayo con los parámetros intermedios como nos indica el modelo factorial seguido en la realización de los ensayos, ver Tabla 16.

Tabla 16: Parámetros intermedios f_a para Titanio (UNS R56400)

Parámetros	Intermedio
Avance tangencial f_a (mm/rev)	0.00225
Avance tangencial por diente f_{za} (mm/z)	0.00075
Velocidad avance tangencial V_{fa} (mm/min)	21.50000

3.4.1.4 Sentido de giro

Por último, tenemos el sentido de giro, una variable cualitativa, en la cual se tienen dos sentidos de giro posibles:

- antihorario (-), Up Milling
- horario (+), Down Milling

El sentido de giro lo definirá el modelo factorial para cada ensayo, en el ensayo con los parámetros intermedios se realizará con los dos sentidos.

3.4.2. Parámetros CFRP

3.4.2.1 Velocidad de corte (V_c)

El fabricante no recomienda parámetros para el mecanizado de CFRP. Se ha realizado una búsqueda de los parámetros utilizados en otros trabajos de fresado helicoidal de CFRP, en la Figura 42 se muestran los parámetros utilizados en otros trabajos.

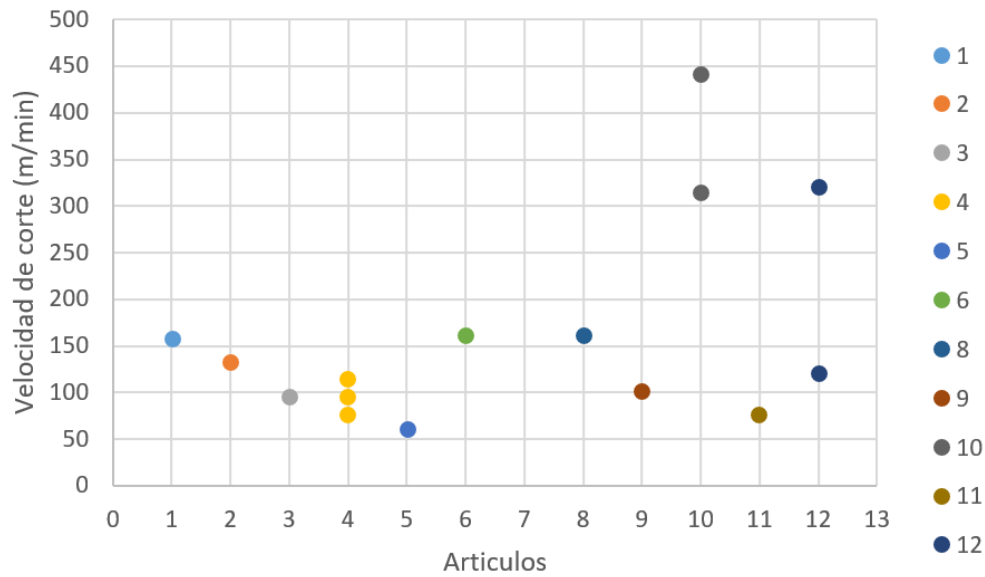


Figura 42: Velocidad de corte CFRP, 1 [25], 2 [26], 3 [17], 4 [27], 5 [28], 6 [29], 8 [30], 9 [31], 10 [32], 11 [33], 12 [19]

Las velocidades de corte elegidas para este estudio son las que se pueden ver en la Tabla 17.

Tabla 17: Parámetros V_c para CFRP

Parámetros	Mínimo	Máximo
$V_c(\text{m/min})$	75	150
rpm	5968	11937

También se ha realizado un ensayo con los parámetros intermedios como nos indica el diseño factorial seguido en la realización de los ensayos, ver Tabla 18.

Tabla 18: Parámetros V_c para CFRP

Parámetros	Intermedio
$V_c(\text{m/min})$	112.5
rpm	8952

3.4.2.2 Avance tangencial (f_t)

Uno de los parámetros más importantes dentro del fresado helicoidal, ya que nos permite definir la trayectoria que va a realizar la herramienta. El fabricante no recomienda parámetros para el mecanizado de CFRP. Se ha realizado una búsqueda de los parámetros utilizados en otros trabajos de fresado helicoidal de CFRP, en la Figura 43, se muestran los parámetros utilizados en otros trabajos.

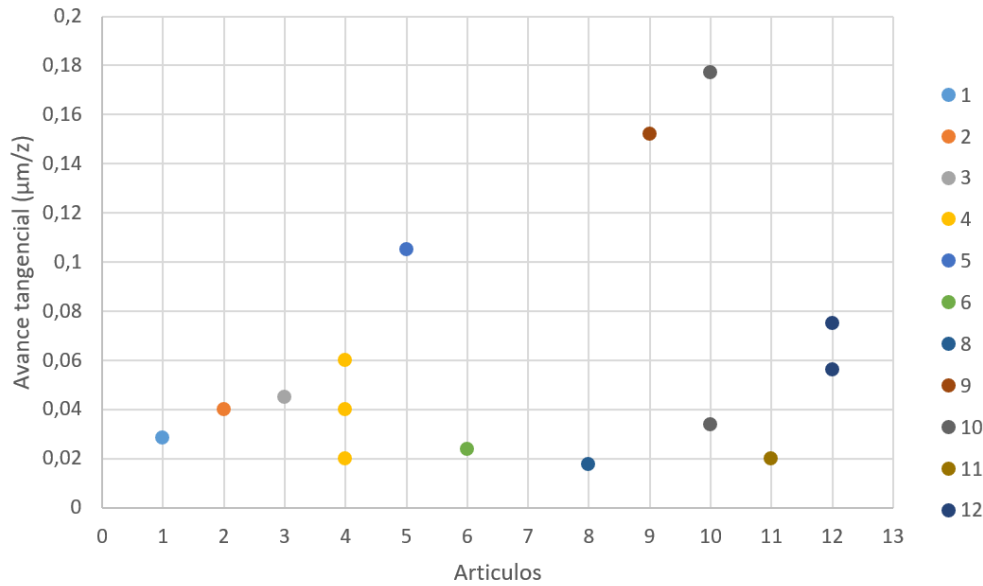


Figura 43: Avance tangencial CFRP, 1 [25], 2 [26], 3 [17], 4 [27], 5 [28], 6 [29], 8 [30], 9 [31], 10 [32], 11 [33], 12 [19]

Las velocidades de avance tangencial elegidas para este estudio son las que se pueden ver en la Tabla 19.

Tabla 19: Parámetros f_t para CFRP		
Parámetros	Mínimo	Máximo
Avance tangencial f_t (mm/rev)	0.090	0.180
Avance tangencial por diente f_{zt} (mm/z)	0.030	0.060
Velocidad avance tangencial V_{ft} (mm/min)	198.790	795.150

También se ha realizado un ensayo con los parámetros intermedios como nos indica el modelo factorial seguido en la realización de los ensayos, ver Tabla 20.

Tabla 20: Parámetros f_t para CFRP	
Parámetros	Intermedio
Avance tangencial f_t (mm/rev)	0.135
Avance tangencial por diente f_{zt} (mm/z)	0.045
Velocidad avance tangencial V_{ft} (mm/min)	447.270

3.4.2.3 Avance axial (f_a)

De igual forma que el avance tangencial, el avance axial tiene mucha importancia dentro del fresado helicoidal. El fabricante no recomienda parámetros para el mecanizado de CFRP. Se ha realizado una búsqueda de los parámetros utilizados en otros trabajos de fresado helicoidal de CFRP, en la Figura 44, se muestran los parámetros utilizados en otros trabajos.

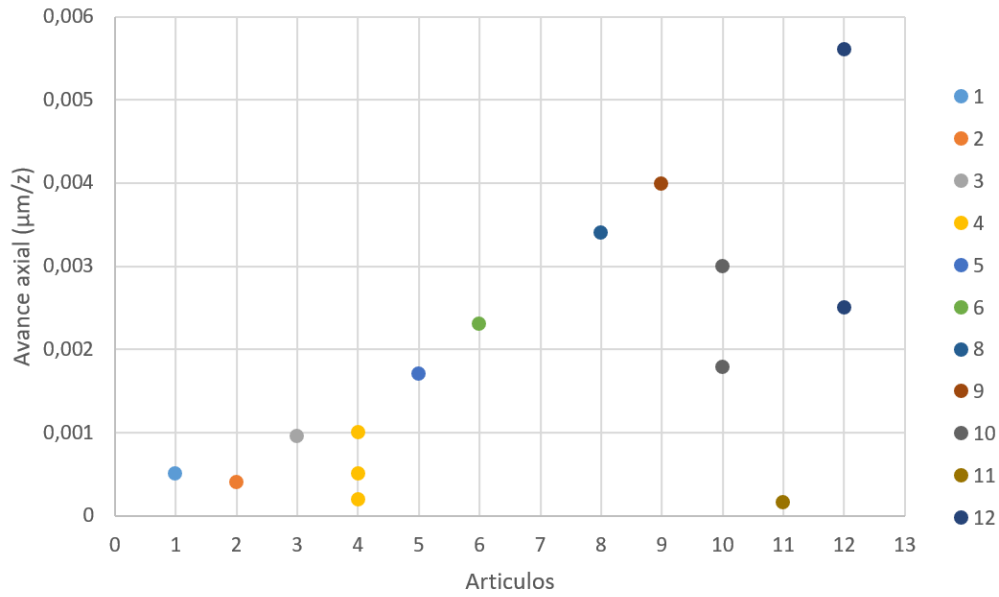


Figura 44: Avance axial CFRP, 1 [25], 2 [26], 3 [17], 4 [27], 5 [28], 6 [29], 8 [30], 9 [31], 10 [32], 11 [33], 12 [19]

Las velocidades de avance axial elegidas para este estudio son las que se pueden ver en la Tabla 21.

Tabla 21: Parámetros f_a para CFRP			
Parámetros		Mínimo	Máximo
Avance tangencial f_a (mm/rev)		0.009	0.018
Avance tangencial por diente f_{za} (mm/z)		0.003	0.006
Velocidad avance tangencial V_{fa} (mm/min)		53.700	214.900

También se ha realizado un ensayo con los parámetros intermedios como nos indica el modelo factorial seguido en la realización de los ensayos, ver Tabla 22.

Tabla 22: Parámetros f_a para CFRP		
Parámetros		Intermedio
Avance tangencial f_a (mm/rev)		0.0135
Avance tangencial por diente f_{za} (mm/z)		0.0045
Velocidad avance tangencial V_{fa} (mm/min)		120.9000

3.4.2.4 Sentido de giro

Por último, tenemos el sentido de giro, una variable cualitativa, en la cual se tienen dos sentidos de giro posibles:

- antihorario (-), Up Milling
- horario (+), Down Milling

El sentido de giro lo definirá el modelo factorial para cada ensayo, en el ensayo con los parámetros intermedios se realizará con los dos sentidos.

3.5. Preparación de ensayos

Una vez obtenido el análisis estadístico se puede planificar correctamente los ensayos a realizar en el laboratorio.

El estudio experimental indica que se tienen que realizar 20 corridas distintas por lo cual necesitaremos 1 herramienta nueva para corrida, necesitando un total de 20 herramientas.

Las probetas preparadas tienen un espesor de 5mm, un ancho de 30mm y un largo de 300 mm para el titanio UNS R56400. Para CFRP las probetas tienen un espesor de 5mm, un ancho de 210mm y un largo de 210mm. Tanto el espesor como el material son muy utilizados en la industria aeroespacial, como el estudio esta centrado en esta industria, se ha priorizado este espesor y material.

3.5.0.1 Centro de mecanizado CNC

El ensayo se realizará del fresado helicoidal, como se lleva indicando todo el documento. El ensayo se realizará en un centro de mecanizado CNC de alta velocidad de 5 ejes, Kondia Five 400 ver Figura 45.



Figura 45: Kondia Five 400.

El controlador utilizado es el denominado iTNC 530 de Heidenhain. Este controlador TNC lleva más de 40 años en el mercado con excelentes resultados en fresadoras, centros de mecanizado y taladros. Esto se debe, por un lado, a la programación orientada al taller y, por otro, a la compatibilidad del programa con otros controles anteriores [112].

El controlador iTNC 530, esta basado en un control digital universal, todos sus componentes están conectados entre sí mediante interfaces puramente digitales, alcanzando una alta disponibilidad del sistema completo. Este sistema esta caracterizado por ser valido para diagnóstico e insensible a interferencias, desde el ordenador principal hasta el sistema de medida. Este controlador garantiza la máxima precisión y calidad superficial, seguido de unas velocidades de desplazamiento muy elevadas [112].

Una de sus características principales es que es flexible, debido a que se puede programar directamente en la máquina, no es necesario haber realizado la programación previamente. Lo que permite, que en mecanizados sencillos no sea necesario la programación de un código complejo que requiere de un alto nivel de programación. Otra de sus ventajas es que se puede programar externamente mediante un sistema CAM [112], ver Figura 46.



Figura 46: Controlador iTNC 530.

En la Figura 47 se puede observar el lenguaje de programación utilizado para mandar la instrucción al centro de mecanizado.



Figura 47: Lenguaje de programación.

Se va a proceder a analizar el código de la Figura 47. En las primeras líneas se define que se va a realizar un fresado helicoidal, el cabezal realizará una hélice a la par que baja. También se definen los parámetros de corte, por ejemplo en la línea 3 se indica el número de revoluciones por minuto.

En la línea 7 se especifica la distancia que realizará la herramienta en la trayectoria de la hélice, esta trayectoria dependerá del ángulo de rampa y velocidad de avance indicada. En este caso, se comienza con 2 mm de entrada y 2 mm de salida. También se especifica el sentido de giro de la hélice (positivo o negativo) y el avance del centro de la herramienta.

3.6. Realización de ensayos

Para la realización de los ensayos se seguirá el orden previsto en la planificación. A la hora de realizar los ensayos es imprescindible que la probeta de ensayos este bien sujeta, ya que se evitará tener que repetir ensayos por vibraciones o malos ajustes, consiguiendo ahorrar tiempo y reducir el coste. Las vibraciones durante el ensayo provoca que se tengan que desechar todos los resultados, este problema es muy comentado por los investigadores.

3.6.1. Sujeción probetas Titanio (UNS R56400)

El sistema de sujeción utilizado para las probetas de Titanio es un sistema sencillo, consiste en dos mordazas que aprisionan la probeta impidiendo el movimiento y por lo cual las vibraciones durante el mecanizado. En la Figura 48 se observa el sistema de sujeción utilizado en más detalle

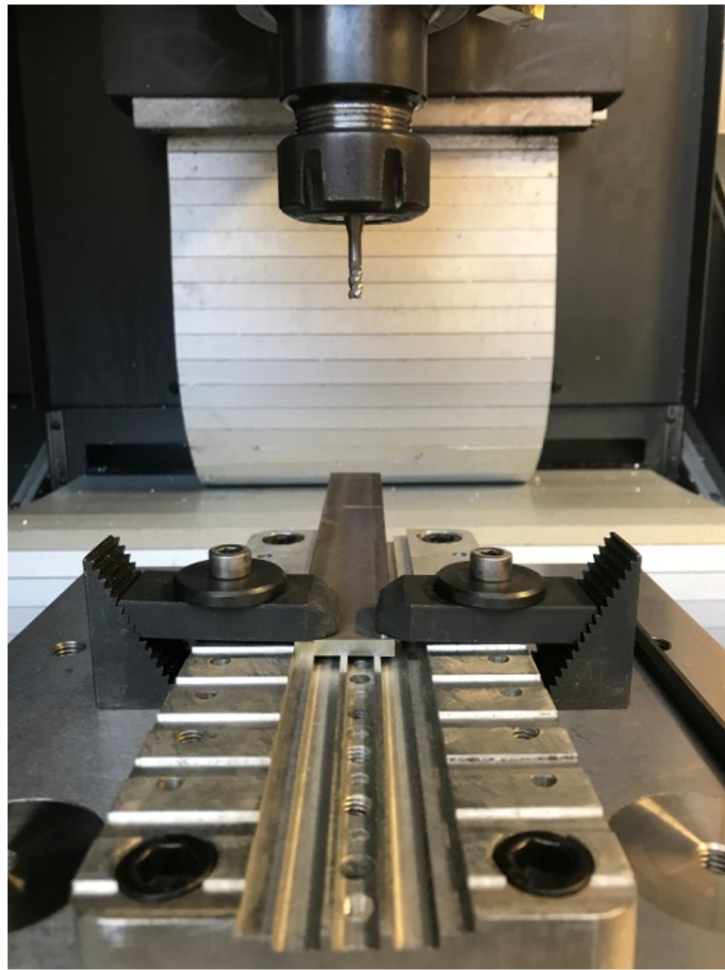


Figura 48: Sujeción de la probeta de Titanio.

3.6.2. Sujeción probetas CFRP

El sistema de sujeción de CFRP es más complejo, se ha desarrollado un modelo en CATIA [113] para explicar el despiece del mismo. En la Figura 49 se puede observar el sistema utilizado para la sujeción.



(a)



(b)

Figura 49: Sujeción de la probeta de CFRP.

En la Figura 50, se puede observar el modelado del sistema de sujeción utilizado en las probetas de CFRP, en la parte superior de la imagen se puede observar los tornillos que sujetaran el marco

superior, representado de color gris, con la plancha de sacrificio, representada de color azul, entre medias de estas dos piezas se sitúa la probeta, representada en color gris oscuro, debajo de todo este sistema en gris claro aparece la mesa dinamométrica, la encargada de registrar las fuerzas durante el mecanizado. Este sistema ha resultado muy eficaz, ya que durante la medición no se han tenido que desechar ningún ensayo.

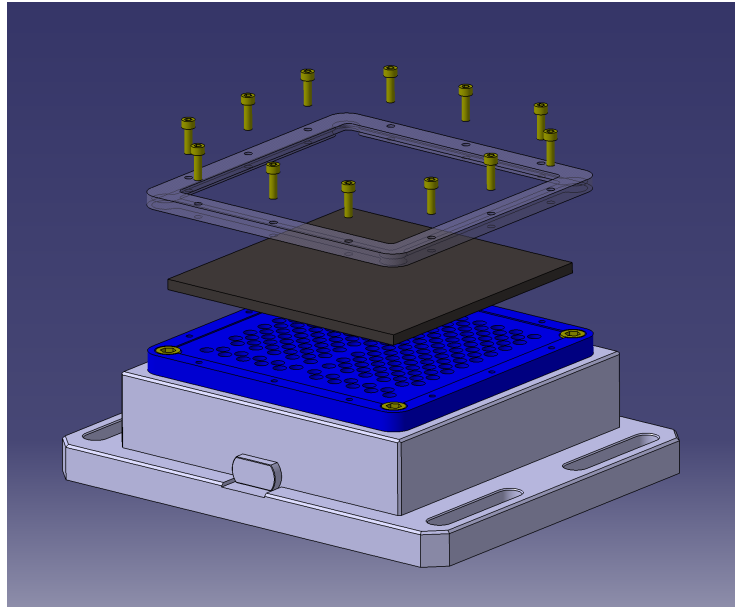


Figura 50: Sujeción de la probeta de CFRP modelada en CATIA.

3.7. Obtención de las fuerzas

La fuerza es el valor de salida que será monitorizado durante los ensayos y el eje fundamental de este trabajo.

La recogida de los datos de fuerza es un proceso muy delicado, cualquier interferencia puede estropear el resultado final, es por eso que la sujeción es muy importante, como ya se ha explicado anteriormente, cada material tiene una forma distinta de sujeción.

Para la medición de las fuerzas se va a utilizar una mesa dinamométrica, una plataforma capaz de realizar la medición de fuerzas que se aplican sobre los tres ejes coordenados, utilizando sensores de presión electrónicos que permiten el volcado de datos a un ordenador, en la Figura 51 se muestra el modelo utilizado.



Figura 51: Mesa dinamométrica Kistler modelo 9255C.

Además de la mesa dinamométrica se utilizará un amplificador de carga, ver Figura 52.



Figura 52: Amplificador Kistler modelo 5070A.

Al mismo tiempo que se está realizando la toma de datos, se puede ir comprando los valores de una manera online tanto en el amplificador como en el ordenador.

3.8. Procesamiento de datos

Una vez finalizados todos los mecanizados se procederá al análisis de las fuerzas obtenidas.

En primer lugar se importaran los datos obtenidos en el fresado a un software específico, en este caso el utilizado ha sido OriginPro [88]. Una vez importados los valores obtendremos una tabla con 4 columnas A(X) Paso de tiempo, B(Y) las fuerzas en el eje X (F_x), C(Y) las fuerzas en el eje Y (F_y), y por último D(Y) las fuerzas en el eje Z (F_z) ver Figura 53

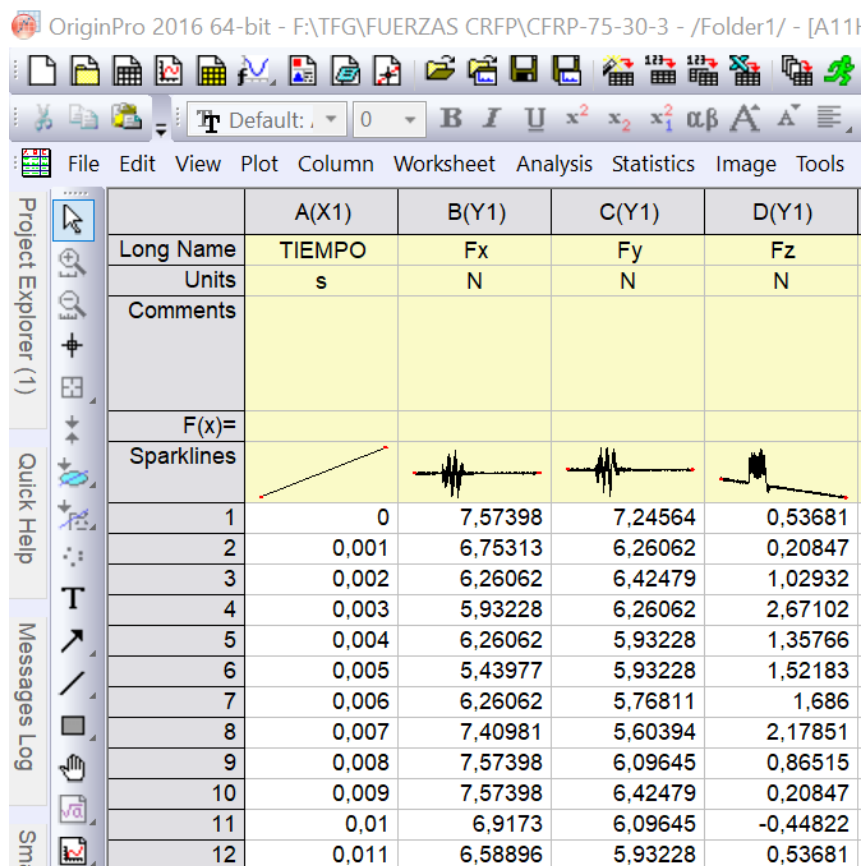


Figura 53: Datos importados en OriginPro.

Se va a proceder al análisis de las fuerzas en el Eje Z ver Figura 54. En la cual se aprecia que la señal tiene mucho ruido además de una cierta deriva.

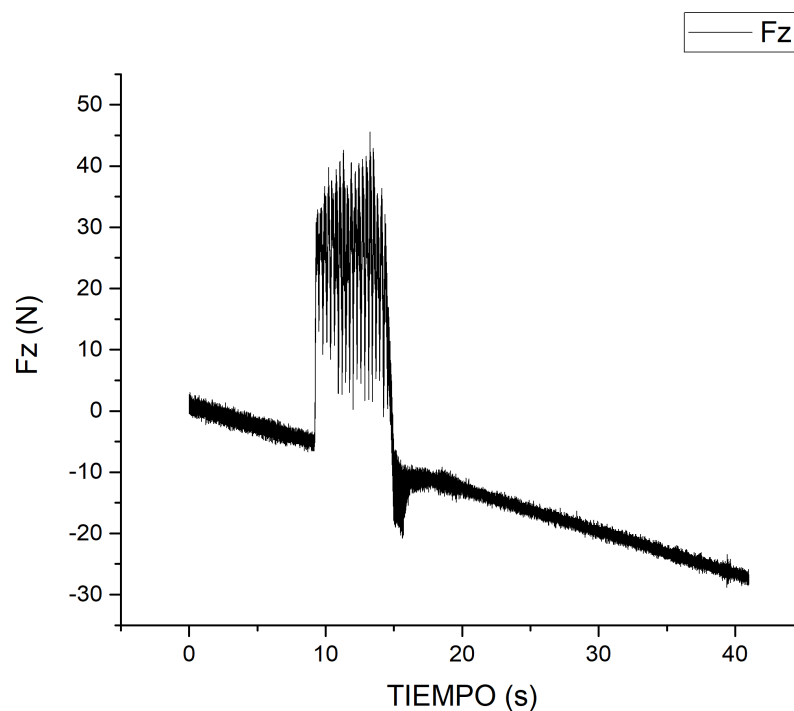


Figura 54: Gráfica señal D(Y), eje Z.

El primer paso será la aplicación de un filtro, el cual nos eliminará el ruido de la señal. Después de realizar varias pruebas el valor del filtro escogido será 50, ya que es el que incluye todos los valores y con el cual eliminamos el ruido, ver Figura 55. En la cual se puede ver que toda la información relevante está por debajo de este valor.

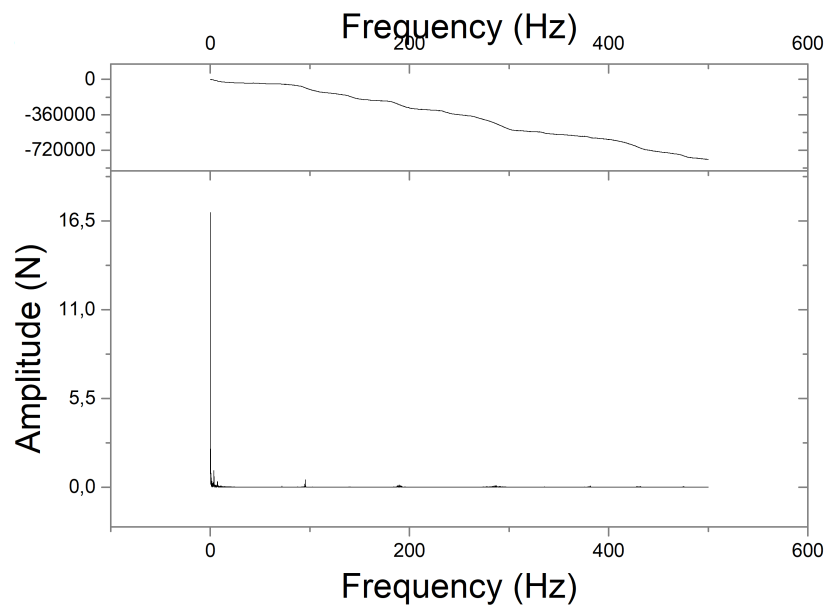


Figura 55: Representación de la dispersión de los valores.

Una vez aplicado el filtro se obtendrán las nuevas medidas ver Figura 56. Con la señal aplicado el filtro se podrá realizar de una manera más sencilla la corrección de la deriva generada en la toma de medidas, mediante la herramienta "Substract Baseline" la cual permite substraerle a las medidas una pendiente. Los valores utilizados se aplicarán a la señal original y a la envolvente de igual forma, ver Figura 57.

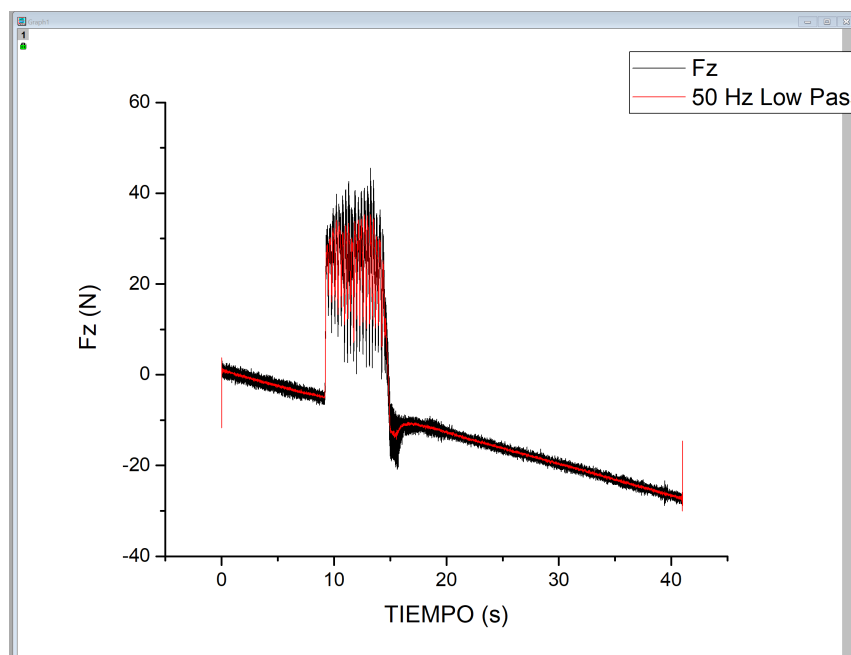


Figura 56: Señal con el filtro aplicado.

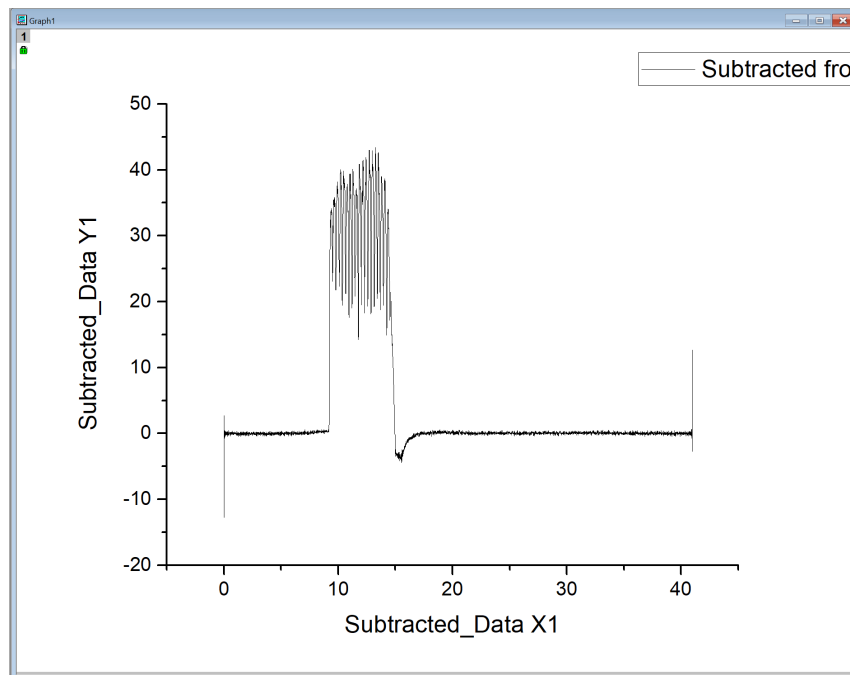


Figura 57: Señal con la corrección de la deriva.

El siguiente paso será corregir la deriva mediante la herramienta "Subtract Baseline" utilizando los mismos parámetros que con la señal con el filtro, ver Figura 58

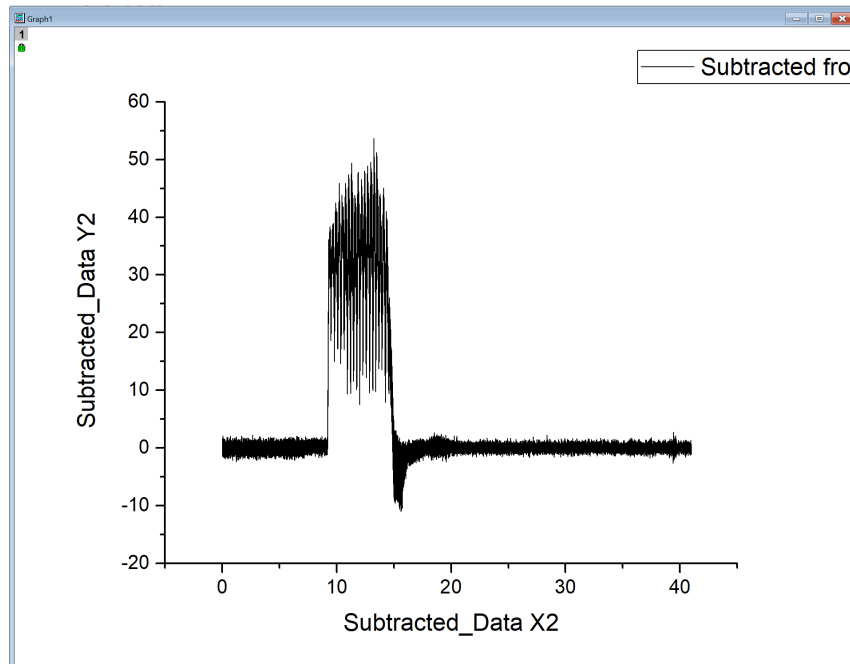


Figura 58: Señal original con la corrección de la deriva.

Por último se obtendrá la envolvente, en primer lugar se definirá el algoritmo que sigue Origin para la obtención de la misma:

1. Descubrir todos los puntos cuya derivada de primer orden es 0 en los datos del origen, valores extremos
2. Realizar una spline cúbica a través de los valores extremos

3. Suaviza los datos interpolados. El método de suavizado empleado aquí es el promedio adyacente, que toma el promedio de un cierto número de puntos de datos alrededor de cada punto en los datos originales, [114].

El valor utilizado para los puntos alrededor de cada punto es 100, el valor que se ha comprobado que menos problemas da y mas precisión aporta. Con este parámetro ya se puede realizar la envolvente, ver Figura 59.

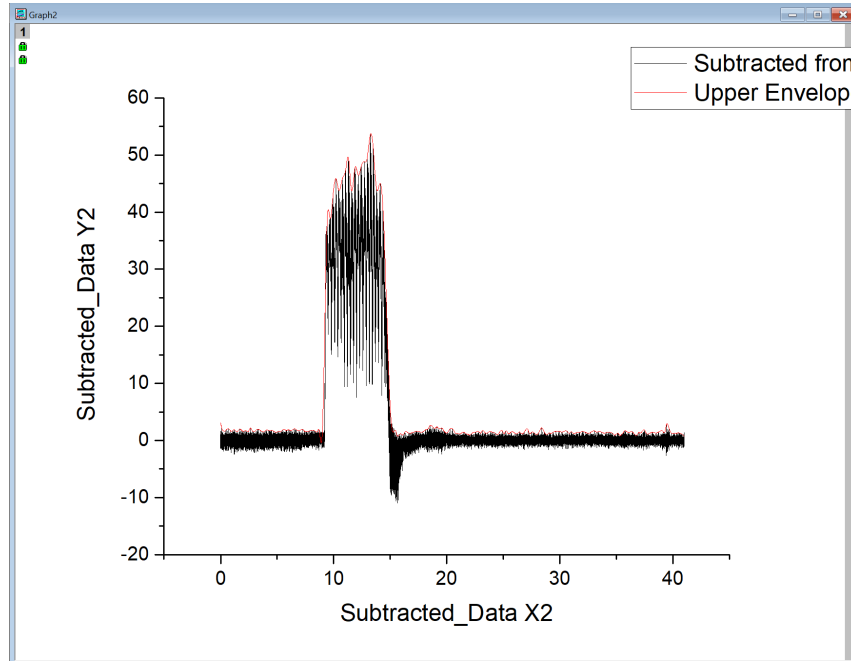


Figura 59: Envolvente superior.

El último paso es calcular el punto de contacto de la herramienta con el material, este punto de contacto se realizará de manera manual, utilizando la herramienta del zoom.

Con estos pasos se habrá acabado con el software OriginPro, ahora se trasladarán los datos a Excel, donde se obtendrá la información necesaria para el análisis de los datos obtenidos.

El primer paso en Excel es copiar los datos obtenidos en el software OriginPro. El siguiente paso será averiguar el punto de inicio del PreMecanizado y del PostMecanizado, estos datos se podrán averiguar debido a que se conoce el punto de contacto de la herramienta con el material y la V_{fa} , se obtendrá en cada mecanizado los siguientes valores, Tabla 23.

Tabla 23: Tiempos mecanizado.	
Inicio PreMecanizado [s]	8,603
Inicio Mecanizado [s]	9,162
Inicio PostMecanizado [s]	14,740
Fin PostMecanizado [s]	15,305

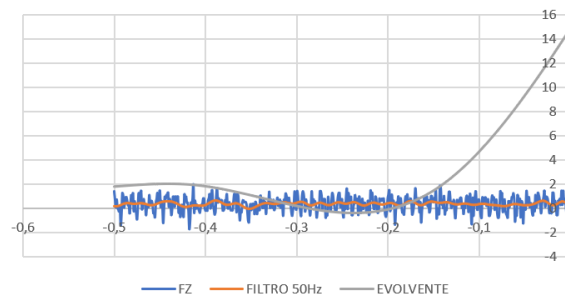
Una vez obtenidos estos dato se podrán separar los datos importados de OriginPro en PreMecanizado, Mecanizado y PostMecanizado, ver Figura 60

Análisis y estudio de las fuerzas de corte producidas durante el fresado helicoidal de materiales de interés aeronáutico

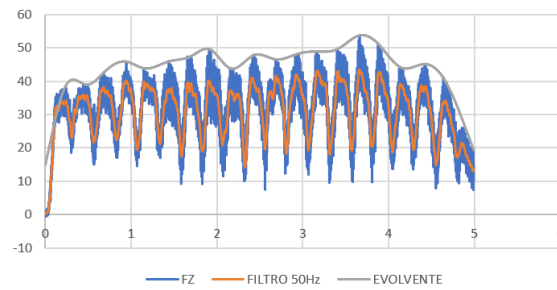
PreMecanizado					Mecanizado					PostMecanizado				
TIEMPO	TO	mm	FZ	FILTRO 50Hz EVOLVENTE	TIEMPO	TO	mm	FZ	FILTRO 50Hz EVOLVENTE	TIEMPO	TO	mm	FZ	FILTRO 50Hz EVOLVENTE
8,603	-0,559	-0,500305	1,36862	0,15273	1,78533	9,162	0	0,93348	0,21601	14,85275	14,74	5,578	4,99231	15,78171
8,604	-0,558	-0,49941	0,71262	0,14154	1,79047	9,163	0,001	0,000895	-0,21503	0,20511	14,95723	14,741	5,579	4,993205
8,605	-0,557	-0,498515	0,05663	0,13708	1,79561	9,164	0,002	0,00179	0,114	0,20677	15,06185	14,742	5,58	4,9941
8,606	-0,556	-0,49762	0,714	0,13976	1,80074	9,165	0,003	0,002685	1,09971	0,22086	15,16659	14,743	5,581	4,994995
8,607	-0,555	-0,496725	0,05801	0,14954	1,80588	9,166	0,004	0,00358	0,44372	0,24628	15,27147	14,744	5,582	4,99589
8,608	-0,554	-0,49583	-0,10547	0,16592	1,81101	9,167	0,005	0,004475	-0,0461	0,2811	15,37646	14,745	5,583	4,996785
8,609	-0,553	-0,494935	-0,26895	0,18798	1,81613	9,168	0,006	0,00537	-0,53992	0,32266	15,48158	14,746	5,584	4,99768
8,61	-0,552	-0,49404	0,06008	0,21444	1,82124	9,169	0,007	0,006265	0,28162	0,36786	15,58682	14,747	5,585	4,998575
8,611	-0,551	-0,493145	-1,41676	0,24375	1,82634	9,17	0,008	0,00716	1,10316	0,4134	15,69218	14,748	5,586	4,99947
8,612	-0,55	-0,49225	-0,43105	0,27419	1,83143	9,171	0,009	0,008055	0,44717	0,45608	15,79765	14,749	5,587	5,000365
8,613	-0,549	-0,491355	1,21135	0,30402	1,83649	9,172	0,01	0,00895	1,10454	0,49303	15,90323	14,75	5,588	5,00126
8,614	-0,548	-0,49046	1,04787	0,33161	1,84154	9,173	0,011	0,009845	0,77689	0,52201	16,00892	14,751	5,589	5,002155
8,615	-0,547	-0,489565	0,06353	0,35554	1,84656	9,174	0,012	0,01074	0,1209	0,54156	16,11471	14,752	5,59	5,00305
8,616	-0,546	-0,48867	0,39256	0,37472	1,85156	9,175	0,013	0,011635	0,44993	0,55112	16,22061	14,753	5,591	5,003945
8,617	-0,545	-0,487775	0,88577	0,38845	1,85654	9,176	0,014	0,01253	1,1073	0,55106	16,32661	14,754	5,592	5,00484
8,618	-0,544	-0,48688	0,88646	0,39649	1,86148	9,177	0,015	0,013425	-0,36954	0,54268	16,4327	14,755	5,593	5,005735
8,619	-0,543	-0,485985	0,5588	0,39903	1,86639	9,178	0,016	0,01432	-0,20468	0,52803	16,53889	14,756	5,594	5,00663
8,62	-0,542	-0,48509	0,23115	0,39669	1,87126	9,179	0,017	0,015225	0,38552	0,50977	16,64517	14,757	5,595	5,007525
8,621	-0,541	-0,484195	0,23184	0,39041	1,8761	9,18	0,018	0,01611	0,28921	0,49091	16,75154	14,758	5,596	5,00842
8,622	-0,54	-0,4833	-0,42415	0,3814	1,8809	9,181	0,019	0,017005	0,45407	0,47456	16,85799	14,759	5,597	5,009315
8,623	-0,539	-0,482405	0,39739	0,371	1,88565	9,182	0,02	0,0179	0,29059	0,46366	16,96453	14,76	5,598	5,01021
8,624	-0,538	-0,48151	1,05477	0,36058	1,89036	9,183	0,021	0,018795	1,11213	0,46072	17,07115	14,761	5,599	5,011105
8,625	-0,537	-0,480615	0,56295	0,35137	1,89503	9,184	0,022	0,01969	0,94865	0,46765	17,17784	14,762	5,6	5,012
8,626	-0,536	-0,47972	1,22032	0,34441	1,89964	9,185	0,023	0,020585	0,94934	0,48561	17,28461	14,763	5,601	5,012895
8,627	-0,535	-0,478825	-0,25653	0,34041	1,9042	9,186	0,024	0,02148	1,77089	0,51492	17,39145	14,764	5,602	5,01379
8,628	-0,534	-0,47793	0,56501	0,33975	1,90871	9,187	0,025	0,022375	0,45821	0,55508	17,49836	14,765	5,603	5,014685
8,629	-0,533	-0,477035	-0,09098	0,34238	1,91316	9,188	0,026	0,02327	-0,03361	0,60491	17,60533	14,766	5,604	5,01558
8,63	-0,531	-0,47614	0,49862	0,33781	1,91755	9,189	0,027	0,024165	0,10793	0,66761	17,71227	14,767	5,605	5,016475

Figura 60: Datos de fuerzas separados en PreMecanizado, Mecanizado, PostMecanizado.

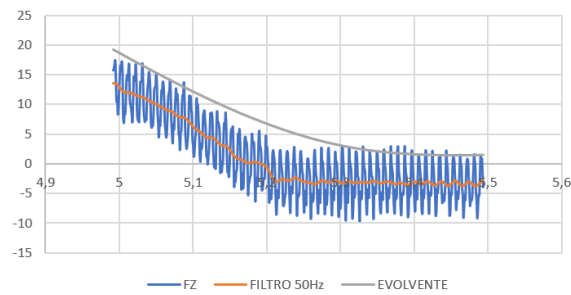
Como se puede observar, se trabajará en mm para facilitar las gráficas ya que resulta más visual que el tiempo. Finalmente se representaran cada una de las partes del mecanizado de manera individual y una gráfica donde se muestren las 3 partes de manera conjunta, ver Figura 61. Y se obtendrán los valores medios tanto del filtro como de la envolvente y la desviación estándar así como el valor máximo, indicar que la media del filtro es igual que la media de la fuerza en z.



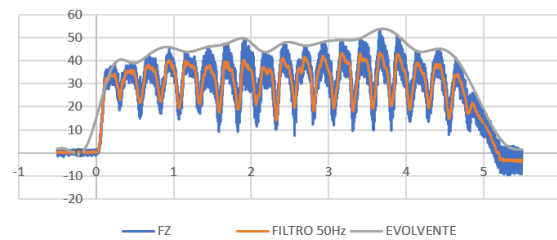
(a) PreMecanizado



(b) Mecanizado



(c) PostMecanizado



(d) Mecanizado completo

Figura 61: Gráficas representación fuerza.

4. Resultados

En este apartado se va a proceder a analizar los resultados obtenidos tanto en CFRP como en Titanio, se va a trabajar con los resultados obtenidos tras realizar la metodología. Como se ha indicado en este trabajo solo se va a estudiar la resultante F_z .

4.1. CFRP

El orden elegido para presentar los resultados es el mismo orden en el cual se han realizado y como se ha indicado en la fracción factorial. En CFRP, se han analizado las fuerzas de la corrida 1, 3, 7, 10. Se han elegido estas tandas por ver la evolución de las fuerzas en 2 Fresado al principio del mecanizado y 2 al final del mecanizado.

Todas las tablas que se van a presentar ahora poseen el mismo formato, número del agujero dentro de los parámetros elegidos, este podrá ser 1, 3, 7, 10. La media de F_z durante el mecanizado, la media de la envolvente, el valor máximo y la diferencia entre la envolvente y la media. Además se ha realizado una representación gráfica de todas las corridas, estas serán ajuntadas como anexos, las gráficas que presenten peculiaridades serán también comentadas en los resultados.

4.1.1. Resultados CFRP

En la Tabla 24 se puede observar como existe un aumento de las fuerzas a medida que realizamos más mecanizados con la herramienta, este aumento se puede apreciar tanto en la media como en el valor máximo, la media en el primer mecanizado es de 31.109 N, mientras en el 10 es de 49.585 N, habiendo un aumento de 18.476 N. El valor máximo en el mecanizado número 10 es de 85.580 N, 31.916 N superior que en el primer mecanizado. En este caso se puede ver como la diferencia entre la media y la envolvente se mantiene constante a lo largo de las diferentes corridas, los datos de la Tabla 24 serán representados en la Figura 62.

Tabla 24: 1_HM_CFRP_75_30_3_C

Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	31.109 N	41.298 N	46.684 N	49.585 N
Media Envolvente	44.368 N	54.650 N	62.404 N	62.434 N
Valor Máximo	53.664 N	67.529 N	81.864 N	85.580 N
Diferencia Envolvente - Media	13.259 N	13.351 N	15.719 N	12.848 N

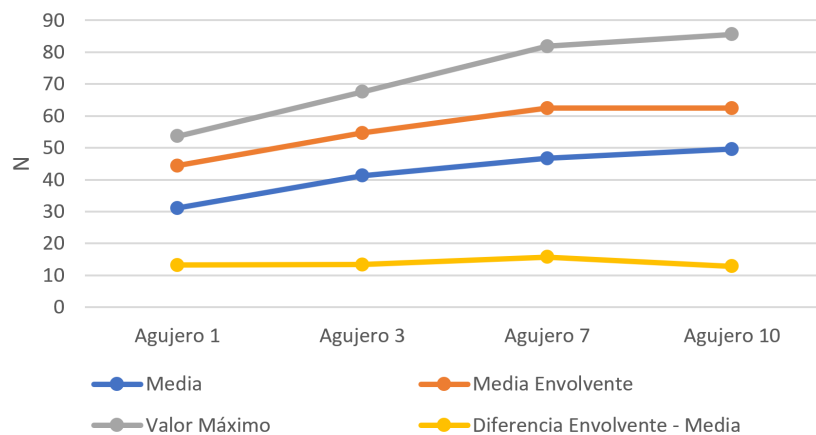


Figura 62: Gráfica tabla de datos 1_HM_CFRP_75_30_3_C

En la Figura 63, se puede observar uno de los mecanizados correspondientes a los parámetros: $V_c = 75$ (m/min), $f_{zt} = 0.03$ (mm/z), $f_{za} = 0.003$ (mm/z) y sentido horario. Una de las características más destacable de las gráficas de CFRP es que se puede observar perfectamente cuando atraviesa

una de las láminas que conforman al material, en este estudio el material tiene un espesor de 5 mm y un total de 20 capas, dato que se puede apreciar perfectamente en estas gráficas.

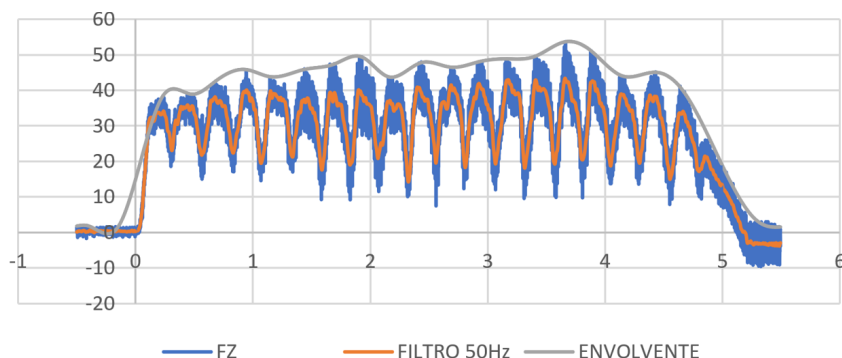


Figura 63: Gráfica 1_1HM_CFRP_75_30_3_C

En la Tabla 25 de igual forma que en la anterior se observa un aumento en las fuerzas, sin embargo en el agujero 7 y 10 parece que las fuerzas se han estabilizado. La diferencia entre la media y la envolvente en este caso aumenta a medida que se realizan más mecanizados, al igual que pasaba con la media el valor de la diferencia entre media y envolvente es similar en el agujero 7 y 10, los datos de la Tabla 25 serán representados en la Figura 64.

Tabla 25: 2_HM_CFRP_150_30_3_O

Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	29.321 N	37.452 N	42.829 N	44.352 N
Media Envolvente	44.291 N	54.225 N	63.761 N	63.595 N
Valor Máximo	47.097 N	65.591 N	81.424 N	78.390 N
Diferencia Envolvente - Media	14.970 N	16.772 N	20.932 N	19.242 N

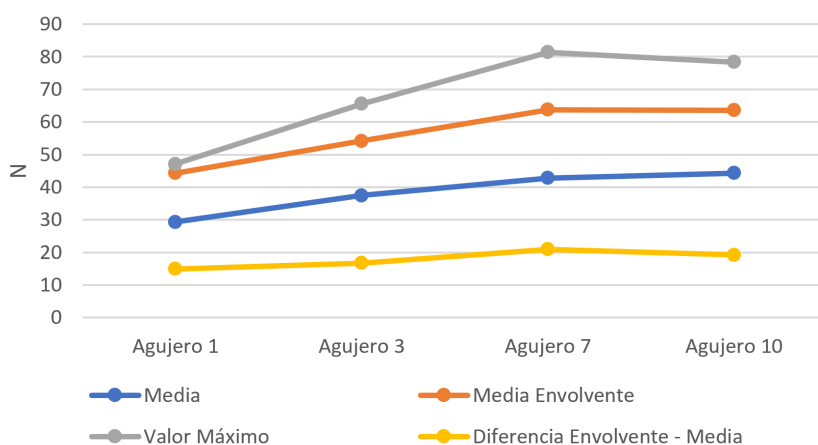


Figura 64: Gráfica tabla de datos 2_HM_CFRP_150_30_3_O

En la Figura 65, se puede observar uno de los mecanizados correspondientes a los parámetros: $V_c = 150$ (m/min), $f_{zt} = 0.03$ (mm/z), $f_{za} = 0.003$ (mm/z) y sentido antihorario. Como se ha indicado anteriormente, en las gráficas de CFRP se puede observar cuantas capas se han mecanizado, en este caso se observa que el fresado todavía no ha terminado. Se ha visto gracias a la representación de las gráficas, que cuando se realiza el mecanizado antihorario, el mecanizado no finaliza cuando debería, este problema se tratará más adelante.

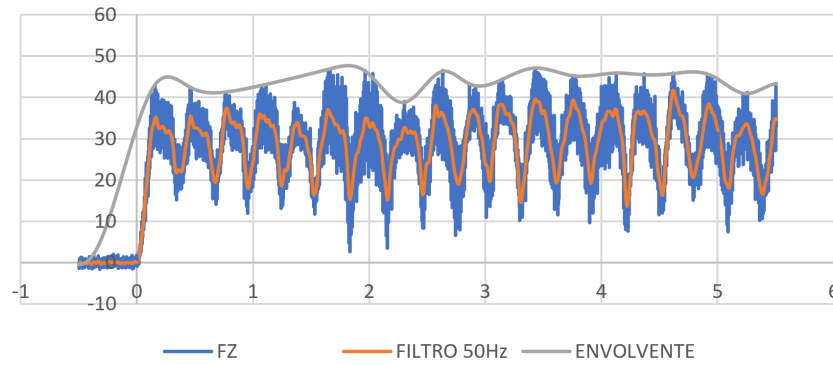


Figura 65: Gráfica 2_1HM_CFRP_150_30_3_O

En la Tabla 26 de igual forma que en la anterior se observa un aumento en las fuerzas, sin embargo en el agujero 7 y 10 parece que el valor de la fuerza media se está estabilizando. La diferencia entre la media y la envolvente en este caso aumenta a medida que se realizan más mecanizados, los datos de la Tabla 26 serán representados en la Figura 66.

Tabla 26: 3_HM_CFRP_75_60_3_O

Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	33.345 N	46.906 N	54.558 N	56.792 N
Media Envolvente	46.590 N	63.018 N	75.299 N	79.362 N
Valor Máximo	51.809 N	73.679 N	91.202 N	97.514 N
Diferencia Envolvente - Media	13.245 N	16.111 N	20.741 N	22.570 N

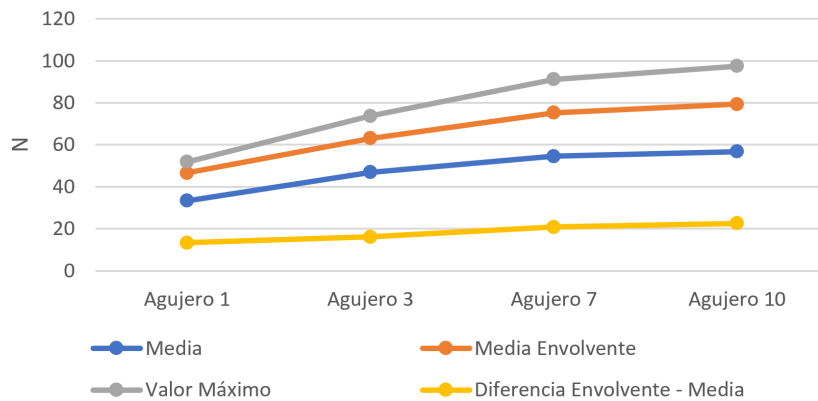


Figura 66: Gráfica tabla de datos 3_HM_CFRP_75_60_3_O

En la Figura 67, podría parecer que el mecanizado ha finalizado bien, pero esto no es así, en la Figura 68 se observa como cuando llega a 5mm el mecanizado continúa, faltándole 2 capas por mecanizar todavía. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 75$ (m/min), $f_{zt} = 0.06$ (mm/z), $f_{za} = 0.003$ (mm/z) y sentido antihorario. Como se ha indicado anteriormente en los mecanizados realizados en sentido antihorario, el mecanizado no finaliza cuando debería, este problema se tratará más adelante.

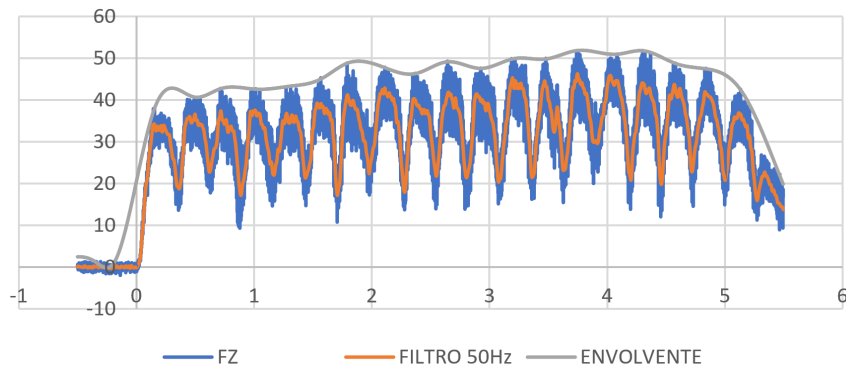


Figura 67: Gráfica 3_1HM_CFRP_75_60_3_O

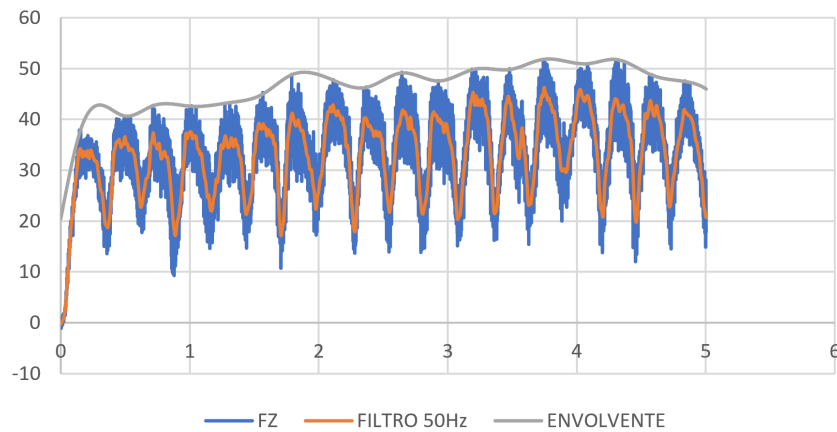


Figura 68: Gráfica 3_1HM_CFRP_75_60_3_O, premecanizado y mecanizado, sin postmecanizado

En la Tabla 27 de igual forma que en la anterior se observa un aumento en las fuerzas, al igual que en la anterior, en el agujero 7 y 10 parece que el valor de la fuerza media se está estabilizando. La diferencia entre la media y la envolvente en este caso aumenta a medida que se realizan más mecanizados, los datos de la Tabla 27 serán representados en la Figura 69.

Tabla 27: 4_HM_CFRP_150_60_3_C

Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	29.934 N	40.176 N	48.384 N	49.772 N
Media Envolvente	44.957 N	62.691 N	73.988 N	77.510 N
Valor Máximo	50.568 N	71.644 N	88.255 N	92.597 N
Diferencia Envolvente - Media	15.023 N	22.514 N	25.604 N	27.737 N

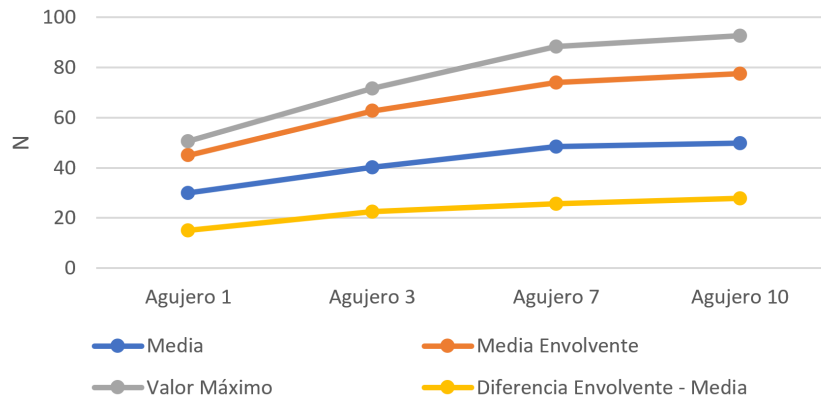


Figura 69: Gráfica tabla de datos 4_HM_CFRP_150_60_3_C

En la Figura 70, se observa como el mecanizado en sentido de giro horario se finaliza en el milímetro 5. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 150$ (m/min), $f_{zt} = 0.06$ (mm/z), $f_{za} = 0.003$ (mm/z) y sentido horario. En la gráfica también se puede observar un aumento de las fuerzas en las últimas capas del mecanizado.

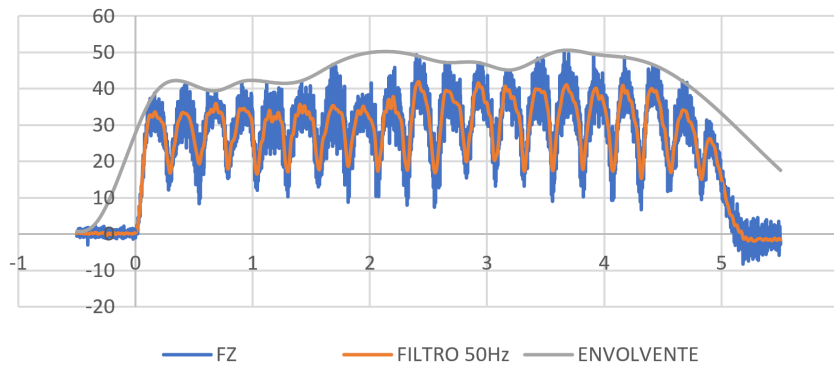


Figura 70: Gráfica 4_1HM_CFRP_150_60_3_C

En la Tabla 26 solo se muestran los datos para el primer mecanizado, de esta corrida de datos solo se tiene los datos correspondientes al primer agujero, ya que el archivo con los 9 restantes esta en blanco, esto se debe a un error al guardar los datos. Este es el único error dentro de los 100 ensayos. Como solo se tiene un agujero, no se ha podido estudiar la evolución de estos parámetros.

Tabla 28: 5_1HM_CFRP_75_30_6_O

Datos	Agujero 1
Media	31.799 N
Media Envolvente	47.124 N
Valor Máximo	51.634 N
Diferencia Envolvente - Media	15.325 N

Como dato a destacar, este es el único mecanizado realizado en sentido antihorario que finaliza a los 5 mm. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 75$ (m/min), $f_{zt} = 0.03$ (mm/z), $f_{za} = 0.006$ (mm/z) y sentido antihorario ver la Figura 71.

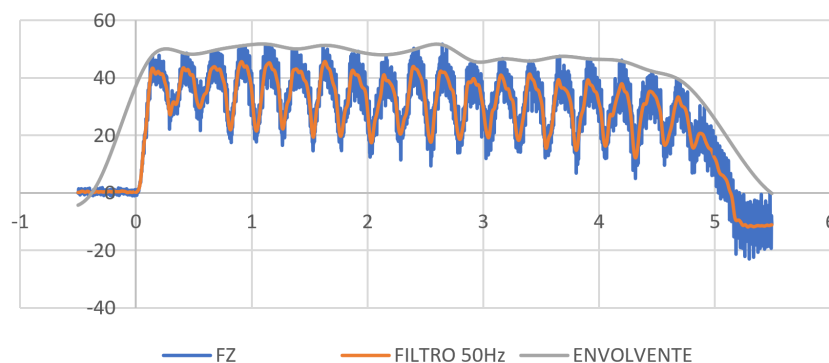


Figura 71: Gráfica 5_1HM_CFRP_75_30_6_O

En la Tabla 29 se puede observar un aumento casi lineal de la fuerza media, también se observa una reducción de la diferencia envolvente - media en el agujero 7 y 10, ya que esta diferencia se reduce, los datos de la Tabla 29 serán representados en la Figura 72.

Tabla 29: 6_HM_CFRP_150_30_6_C

Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	32.115 N	43.930 N	54.549 N	58.200 N
Media Envolvente	52.308 N	67.924 N	88.376 N	89.591 N
Valor Máximo	58.425 N	79.214 N	95.465 N	103.627 N
Diferencia Envolvente - Media	20.192 N	23.993 N	33.827 N	31.391 N

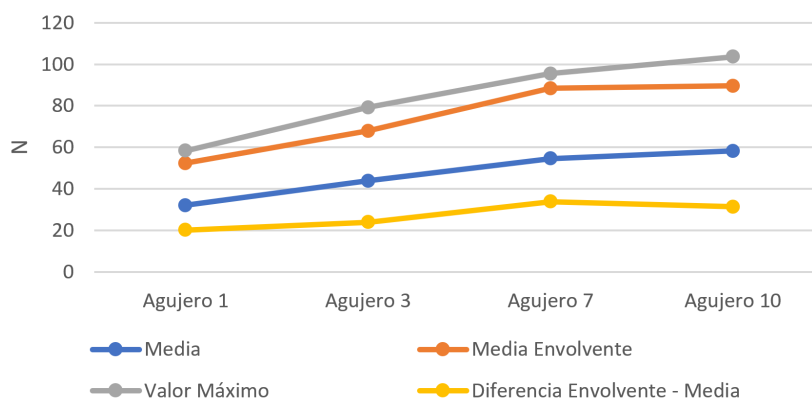


Figura 72: Gráfica tabla de datos 6_HM_CFRP_150_30_6_C

En la Figura 73, se puede observa, como en todos los mecanizados realizados en el sentido horario, que el mecanizado finaliza a los 5 mm, también se puede observar como a partir del milímetro 2.5, aumenta considerablemente la amplitud de la señal F_z . La señal al final parece que no se estabiliza, este dato se ha comprobado dando como resultado que la gráfica acaba alineándose en torno a 0 pasados unos segundos más. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 150$ (m/min), $f_{zt} = 0.03$ (mm/z), $f_{za} = 0.006$ (mm/z) y sentido horario.

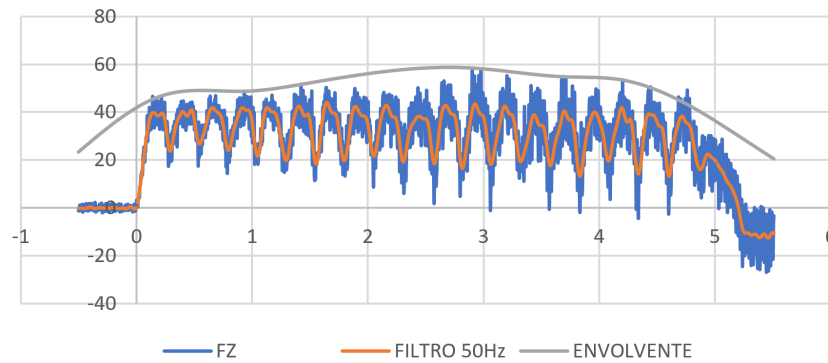


Figura 73: Gráfica 6_1HM_CFRP_150_30_6_C

En la Tabla 30, se puede apreciar como existe un gran aumento de las fuerzas, la media del agujero 1 es 31.375 N y la del agujero 10 es casi el doble. Un dato destacable es que la diferencia envolvente - media es similar 2 a 2, es decir el agujero 1 y 3 tienen una diferencia casi lineal y el agujero 7 y 10 también, los datos de la Tabla 30 serán representados en la Figura 74.

Tabla 30: 7_HM_CFRP_75_60_6_C

Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	31.375 N	44.621 N	55.920 N	60.723 N
Media Envolvente	49.232 N	61.968 N	79.904 N	84.057 N
Valor Máximo	53.792 N	70.502 N	96.880 N	107.987 N
Diferencia Envolvente - Media	17.856 N	17.346 N	23.984 N	23.333 N

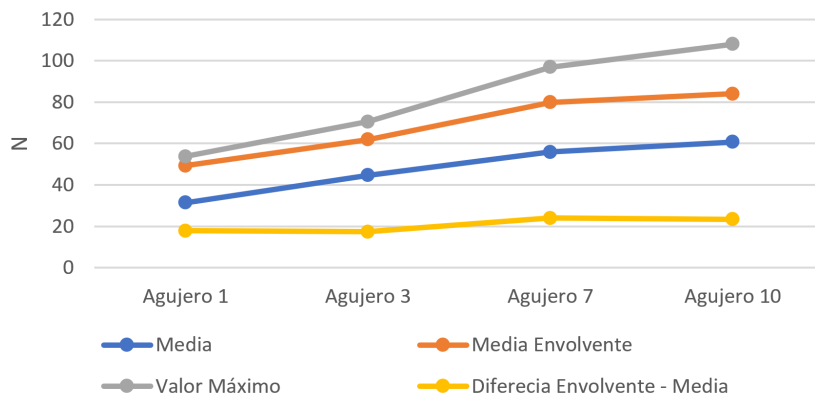


Figura 74: Gráfica tabla de datos 7_HM_CFRP_75_60_6_C

En la Figura 75, se puede observar, como en todos los mecanizados realizados en el sentido horario, que el mecanizado finaliza a los 5 mm, a diferencia de como pasaba antes, el aumento de la amplitud de la señal F_z , se produce a partir de la capa 3. De igual forma que antes, la señal al final parece no estabilizarse, este dato se ha comprobado dando como resultado que la gráfica acaba alineándose en torno a 0 pasados unos segundos más. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 75$ (m/min), $f_{zt} = 0.06$ (mm/z), $f_{za} = 0.006$ (mm/z) y sentido horario.

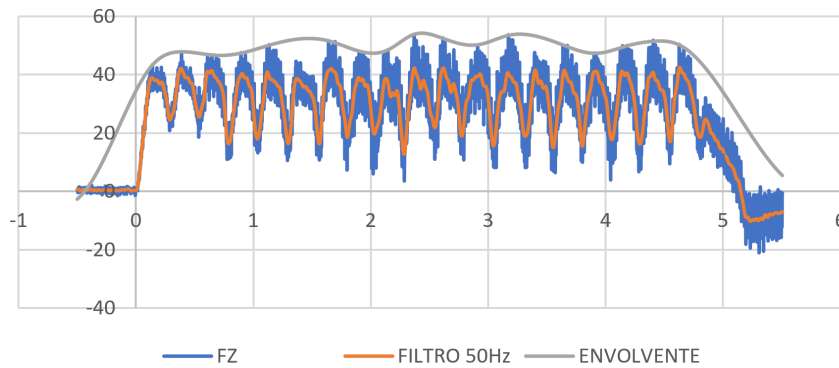


Figura 75: Gráfica 7_1HM_CFRP_75_60_6_C

En la Tabla 31, se puede apreciar como existe un gran aumento de las fuerzas, todos los valores son ascendentes, no parecen estabilizarse en ningún agujero, los datos de la Tabla 31 serán representados en la Figura 76.

Tabla 31: 8_HM_CFRP_150_60_6_O

Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	30.793 N	43.059 N	54.328 N	58.415 N
Media Envolvente	56.605 N	75.044 N	97.672 N	108.329 N
Valor Máximo	58.815 N	81.453 N	101.058 N	114.032 N
Diferencia Envolvente - Media	25.812 N	31.985 N	43.343 N	49.913 N

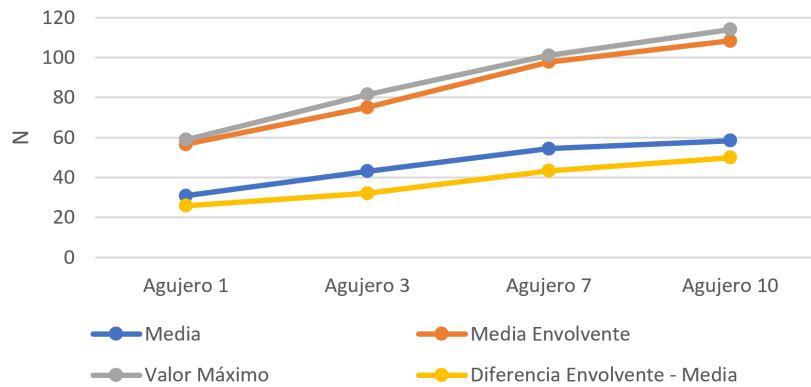


Figura 76: Gráfica tabla de datos 8_HM_CFRP_150_60_6_O

En la Figura 77, de nuevo observamos que el mecanizado no finaliza. Además se puede observar una gran oscilación de los valores F_z . Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 150$ (m/min), $f_{zt} = 0.06$ (mm/z), $f_{za} = 0.006$ (mm/z) y sentido antihorario.

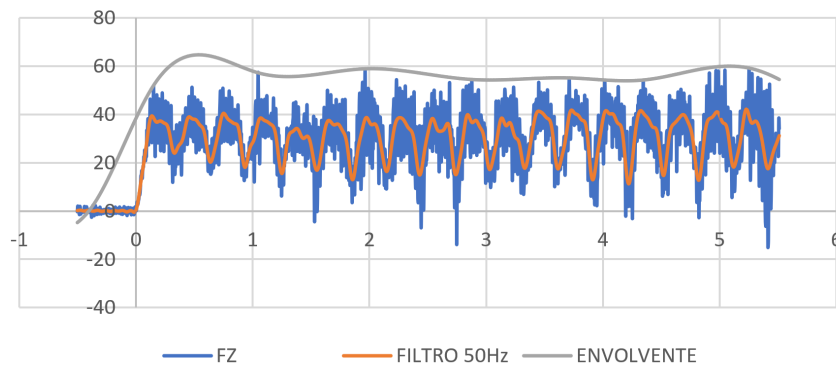


Figura 77: Gráfica 8_1HM_CFRP_150_60_6_C

Por último analizaremos los resultados obtenidos en los puntos medios. En la Tabla 32, se puede observar como la tendencia es ascendente, a medida que se van realizando más mecanizados, los valores de fuerza son mayores. La diferencia envolvente - media parece mantenerse constante en los agujeros 3 y 7, los datos de la Tabla 32 serán representados en la Figura 78.

Tabla 32: 9_HM_CFRP_112.5_45_4.5_C

Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	28.097 N	41.198 N	50.800 N	54.446 N
Media Envolvente	43.598 N	61.830 N	70.663 N	84.259 N
Valor Máximo	50.962 N	67.618 N	76.545 N	105.737 N
Diferencia Envolvente - Media	15.500 N	20.632 N	19.862 N	29.812 N

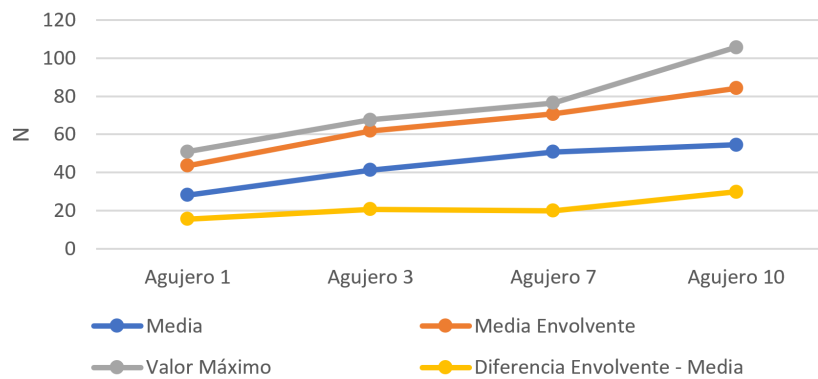


Figura 78: Gráfica tabla de datos 10_HM_CFRP_112.5_45_4.5_C

En la Figura 79, se puede observar como el mecanizado finaliza a los 5 mm, en esta gráfica se puede observar como la oscilación de la F_z aumenta hasta los 2 mm, de 2mm hasta 3 mm parece que la señal se estabiliza y desde 3 mm hasta la salida vuelve a aumentar. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 112.5$ (m/min), $f_{zt} = 0.045$ (mm/z), $f_{za} = 0.0045$ (mm/z) y sentido horario.

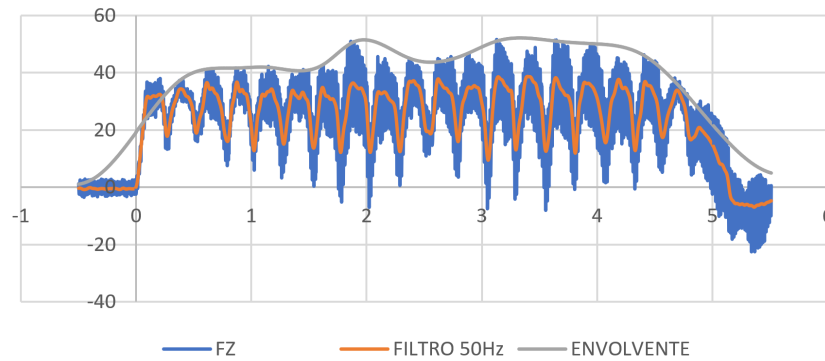


Figura 79: Gráfica 9_1HM_CFRP_150_60_6_C

En la Tabla 33, correspondiente al punto intermedio realizado en sentido antihorario, se puede observar un crecimiento de las fuerzas de manera lineal, la diferencia envolvente - media parece ser constante entre el agujero 1 y 3, los datos de la Tabla 33 serán representados en la Figura 80.

Tabla 33: 10_HM_CFRP_112.5_45_4.5_C

Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	31.049 N	41.694 N	49.472 N	54.862 N
Media Envolvente	48.289 N	59.641 N	72.976 N	84.632 N
Valor Máximo	55.566 N	69.861 N	82.847 N	92.425 N
Diferencia Envolvente - Media	17.239 N	17.947 N	23.504 N	29.769 N

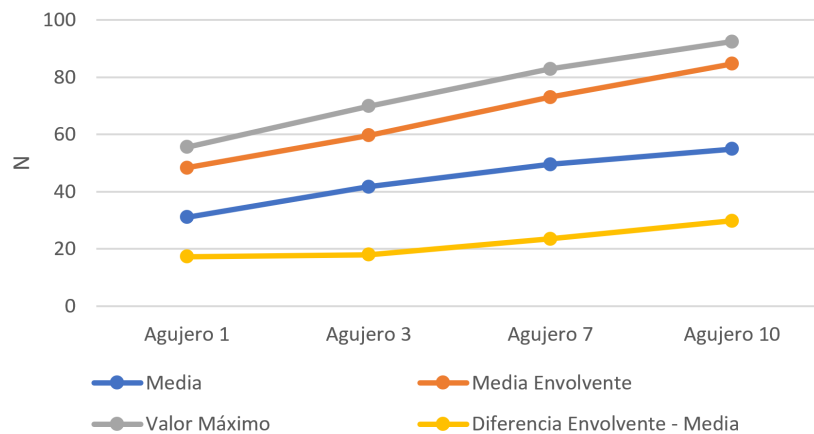


Figura 80: Gráfica tabla de datos 10_HM_CFRP_112.5_45_4.5_O

En la Figura 81, se puede observar como el mecanizado no finaliza a los 5 mm, solo se han mecanizado 17 capas. En esta gráfica se puede observar como la oscilación de la F_z se mantiene constante hasta el milímetro 2 a partir del cual aumenta la oscilación, los parámetros: $V_c = 112.5$ (m/min), $f_{zt} = 0.045$ (mm/z), $f_{za} = 0.0045$ (mm/z) y sentido antihorario.

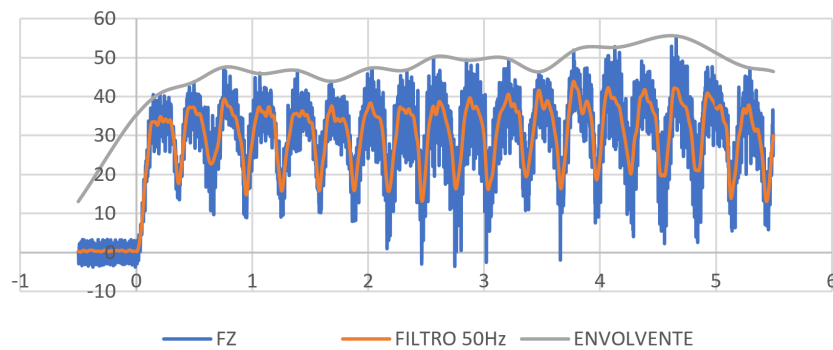


Figura 81: Gráfica 10_1HM_CFRP_112.5_45_4.5_O

4.1.1.1 Resultados evolución

En la Figura 82 se puede observar la evolución de la media a lo largo de la corrida y en los distintos agujeros. Se puede observar como el compartamiento es similar en las 4 corridas. Existe un pico en el ensayo 2 que se replica a lo largo de las diferente corridas con el mismo efecto, al igual que el mínimo del ensayo 3, el resto de los ensayos se observan muy lineales. Es notable la falta de información en el ensayo 5, que perjudica al mejor entendimiento de la gráfica.

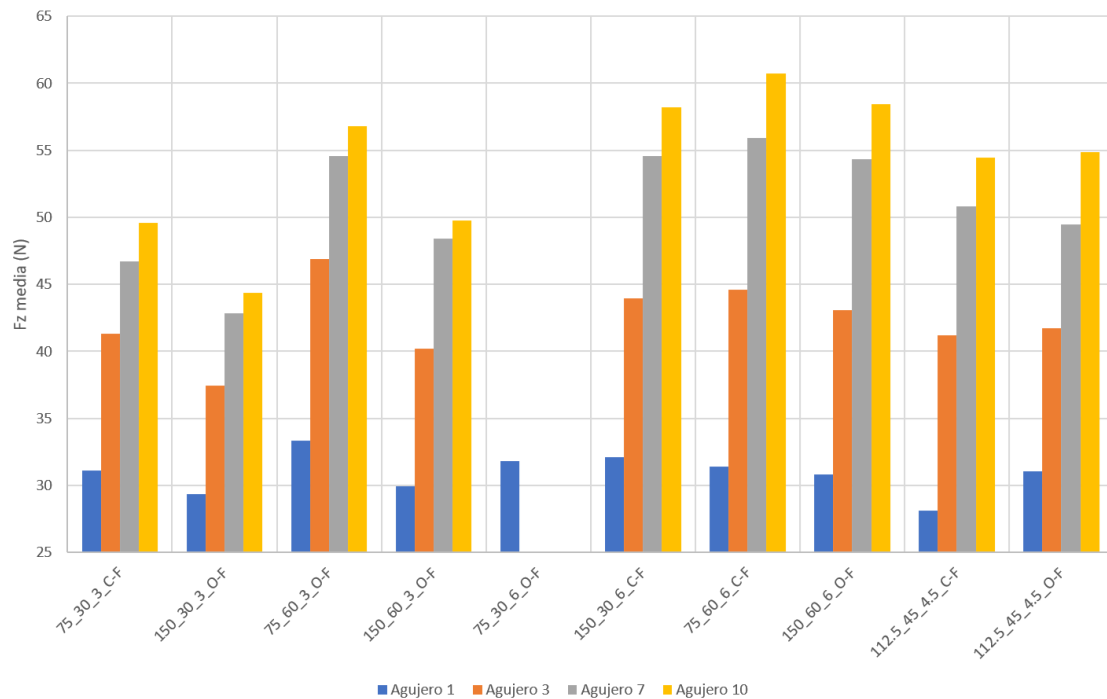


Figura 82: Evolución de la media a lo largo de los mecanizados y con las distintas corridas CFRP.

En la Figura 83 se puede observar la evolución de la media de la envolvente a lo largo de la corrida y en los distintos agujeros. En esta gráfica se puede observar como para el ensayo 3 y 8 existe un incremento considerable de las fuerzas medidas, estos 2 ensayos tienen en igualdad el sentido de giro, oposición. También se puede ver como el aumento de las fuerzas a medida que la herramienta realiza más agujeros es bastante considerable. Al igual que se veía anteriormente la falta de información es muy perjudicial para el correcto estudio.

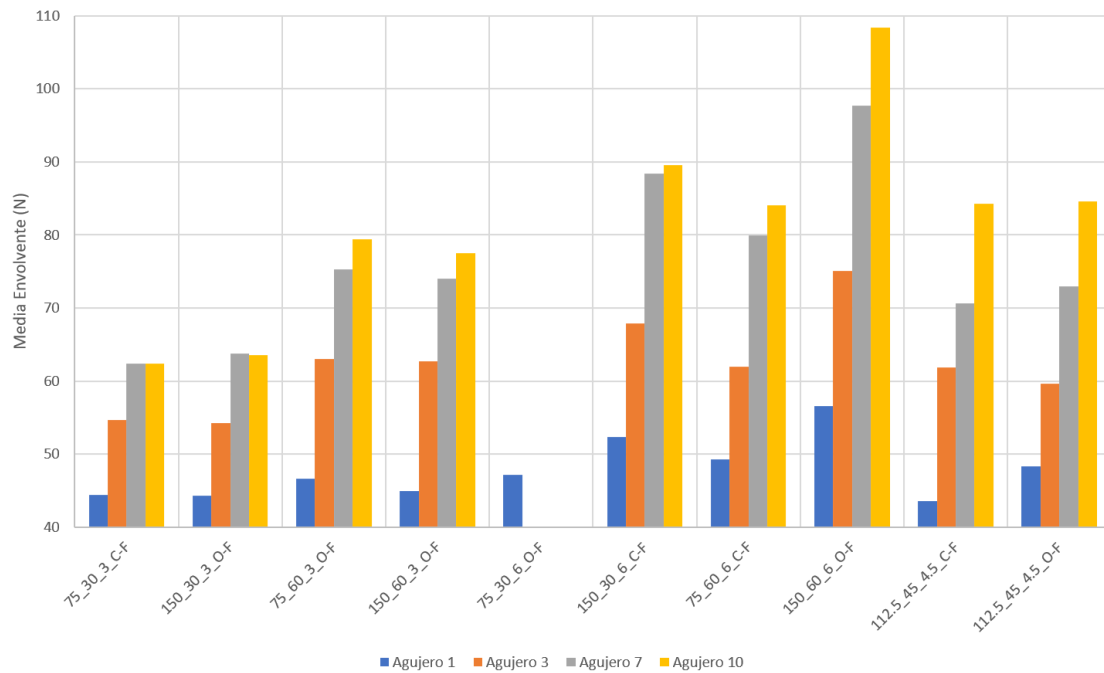


Figura 83: Evolución de la media de la envolvente a lo largo de los mecanizados y con las distintas corridas CFRP.

4.1.1.2 Error espesor

El hecho de que en todos los mecanizados realizados en oposición, el mecanizado no haya finalizado a los 5 mm, espesor de la probeta, es curioso. Analizando las señales, se ha podido comprobar que el mecanizado finalizaba 1 mm después. Se ha estudiado el error cometido en los fresado helicoidales realizados en oposición, el error es menor del 3.5 % si se hubieran considerado los 6mm durante la obtención de los resultados, se considera un error despreciable por lo cual se ha continuado con el análisis. En la Figura, se observa como se verían las diferentes partes del mecanizado en el mecanizado 2_1HM_CFRP_150_30_3_O, en la Tabla 34 se comparan los resultados obtenidos al haber considerado que eran 5 mm en lugar de los 6 mm y el error calculado.

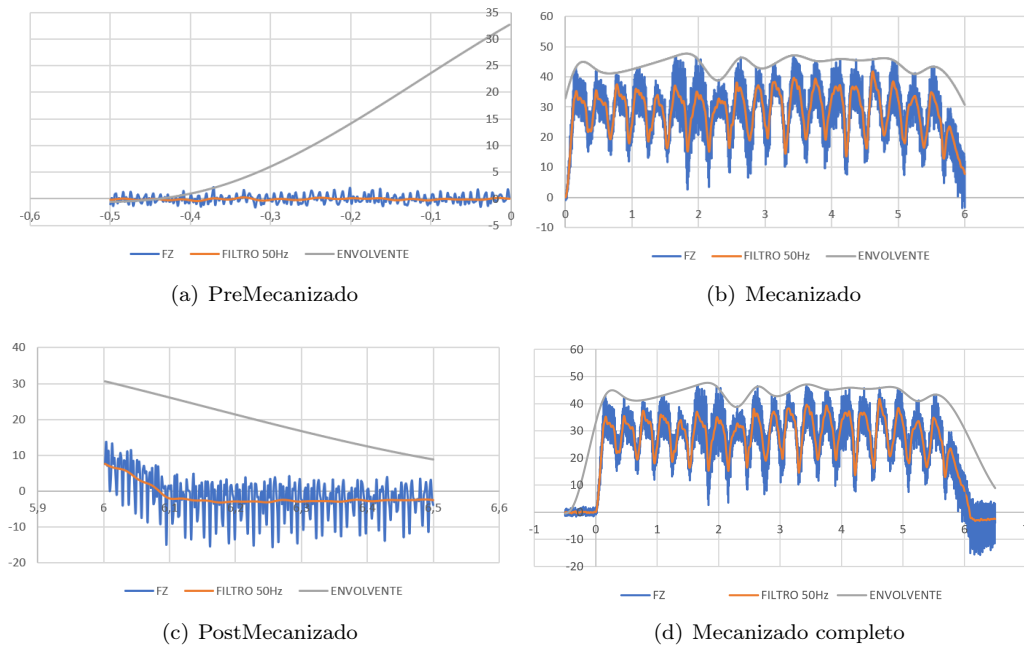


Figura 84: Representación gráfica 2_1HM_CFRP_150_30_3_O sin error.

Tabla 34: Error ensayos en oposición

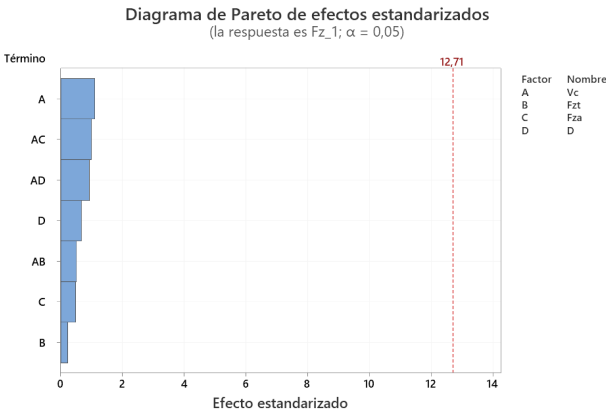
Datos	Estimado	Real	Error Absoluto
Inicio preMecanizado(s)	1.065	1.065	0.000 %
Inicio Mecanizado (s)	1.344	1.344	0.000 %
Inicio PostMecanizado (s)	4.137	4.697	11.933 %
Fin PostMecanizado (s)	4.416	4.975	11.239 %
Media filtro 50Hz (N)	29.321	28.330	3.497 %
Media Envolvente (N)	44.291	43.676	1.408 %
Máximo (N)	47.097	47.097	0.000 %

4.1.1.3 Resultados fracción factorial

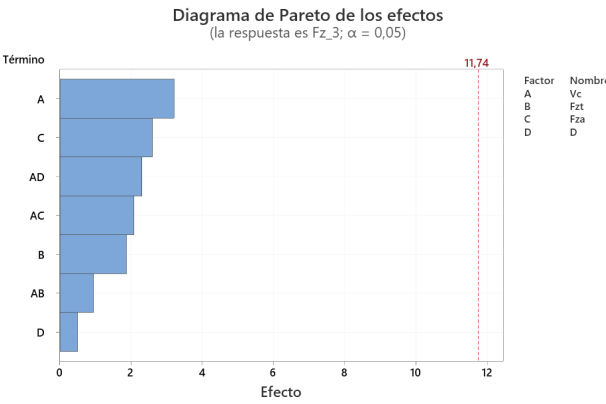
Por último se realizara un estudio en Minitab [24], el software con el que se ha realizado la fracción factorial.

En primer lugar se realizará un diagrama de Pareto, El diagrama de Pareto muestra los valores absolutos de los efectos estandarizados desde el efecto más grande hasta el efecto más pequeño. El diagrama también grafica una línea de referencia que indica cuáles efectos son estadísticamente significativos, esta línea de referencia, depende del nivel de significancia [115].

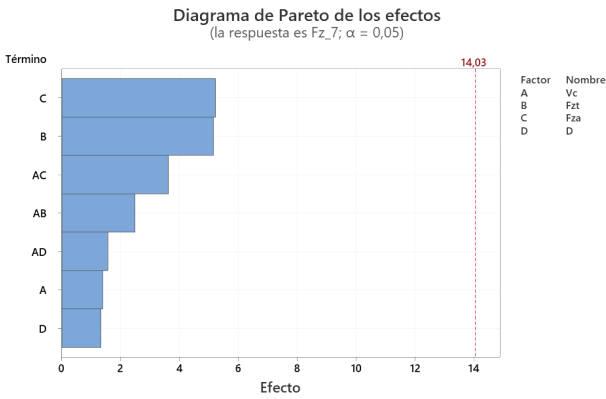
Si se observa la Figura 85 y se analizan las gráficas de manera individual, parece que no exista ningún parámetro estadísticamente significativo. Sin embargo si se observan en conjunto, se puede observar como hay un parámetro que gana importancia a medida que la herramienta realiza más mecanizados, este parámetro es f_{za} . Este parámetro se sitúa en penúltimo lugar cuando se realiza un mecanizado, resultando insignificante, y en el último mecanizado, acaba en primer lugar con una amplia distancia con respecto al siguiente parámetro. La línea de referencia es con un $\alpha = 0,05$ o lo que es lo mismo, con una fiabilidad del 95 %.



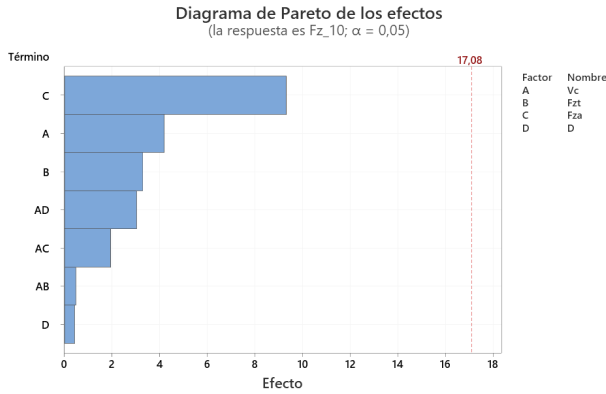
(a) Corrida 1, correspondiente a los agujeros 1



(b) Corrida 3, correspondiente a los agujeros 3



(c) Corrida 7, correspondiente a los agujeros 7



(d) Corrida 10, correspondiente a los agujeros 10

Figura 85: Representación diagramas de Pareto.

Se ha comprobado cual sería el resultado si reduciremos la línea de referencia al 80 %, $\alpha = 0,2$, el resultado es que f_{za} es estadísticamente significativo, ver Figura 86

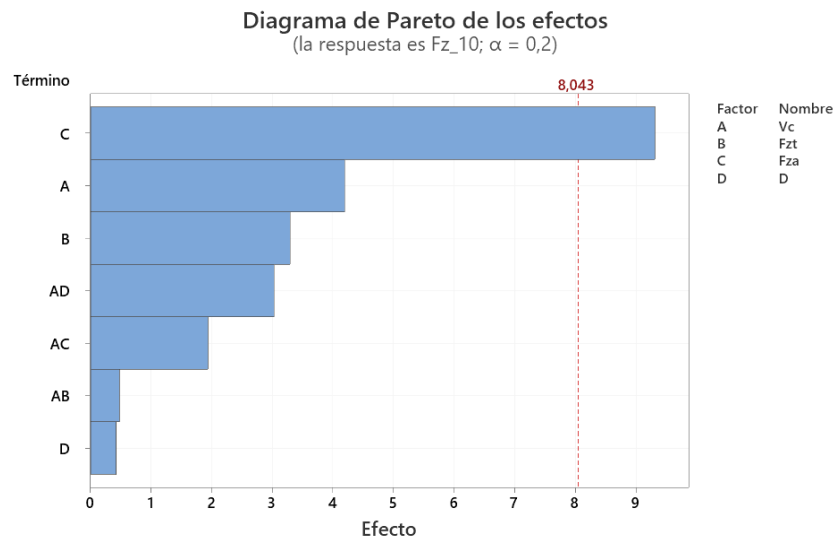


Figura 86: Diagrama de Pareto, corrida 10 con $\alpha = 0,2$

Por último se han comprobado los efectos principales de la primera corrida y la última. Primero se analizarán los resultados mostrados en la Figura 87, correspondientes a la primera corrida, en estos se puede apreciar como el punto central está bastante alejado de las tendencias, la diferencia realmente en N es muy pequeña, siendo menor de 1.75 N. Esta diferencia en las gráficas de efectos principales puede venir por ruidos externos, la incertidumbre de los equipos... Ya que la diferencia es muy pequeña. También es importante comentar que en el diagrama de Pareto, no hay ningún valor estadísticamente significativo, por cual es normal que el punto central aparezca alejado de las tendencias.

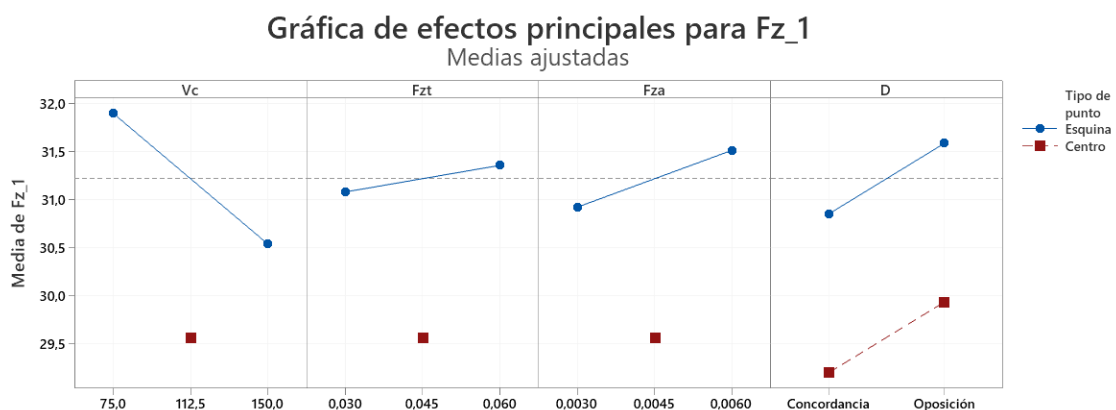


Figura 87: Efectos principales corrida 1

En la Figura 88, se observan los resultados para la corrida 10, en los cuales se observa como el punto central coincide con las tendencias, la escala de esta gráfica ya es mayor, pasando de un paso de 0.5 N como se tenía anteriormente a 2 N. Por lo cual los errores asociados a los equipos, comienza a ser despreciable. Además como se observaba en los diagramas de Pareto comienzan a haber parámetros más significativos.

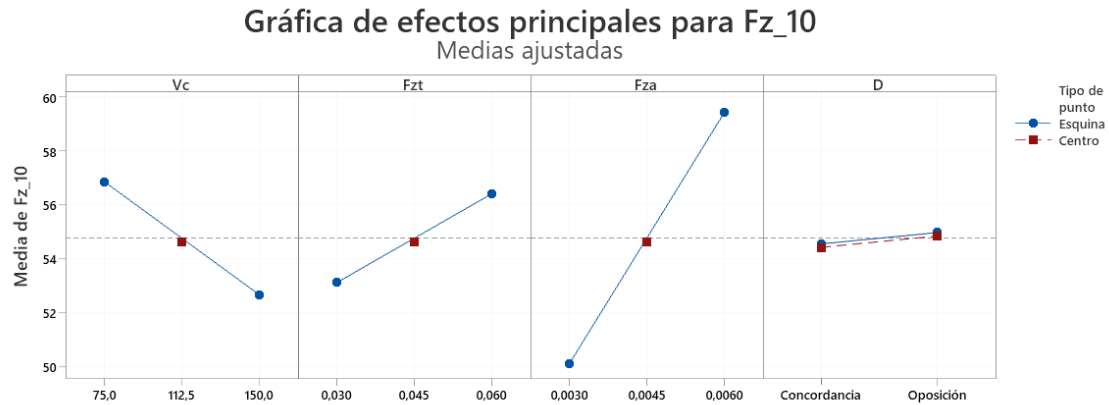


Figura 88: Efectos principales corrida 10

4.1.2. Conclusiones CFRP

En todas las gráficas se puede observar un claro aumento de la fuerza a medida que aumenta el número de agujeros. Como se ha podido estudiar en los diferentes artículos, existe una relación directa entre el desgaste de la herramienta y la fuerza.

Gracias a un estudio estadístico de los datos, se ha podido observar que la f_{za} es el parámetro que más influencia tiene en los valores de fuerza. Esto es debido a que f_{za} va en el mismo sentido que F_z , la fuerza estudiada. Este hecho se acentúa a medida que aumenta el número de agujeros realizados.

Una vez analizados los resultados, se observa la importancia de cada valor, ya que la ausencia de algunos valores impide un análisis completo. Sería interesante volver a realizar estos ensayos para poder terminar el estudio.

4.2. Titanio (UNS R56400)

El orden elegido para presentar los resultados es el mismo orden en el cual se han realizado y como se ha indicado en la fracción factorial. En Titanio, primero se mostraran los resultados de la primera Fase, después de la segunda y por último el ensayo de vida.

Todas las tablas que se van a presentar ahora poseen el mismo formato, número del agujero dentro de los parámetros elegidos, este podrá ser 1, 2, 3. La media de F_z durante el mecanizado, la media de la envolvente, el valor máximo y la diferencia entre la envolvente y la media. Además se ha realizado una representación gráfica de todas las corridas, estas serán ajuntadas como anexos, las gráficas que presenten peculiaridades serán también comentadas en los resultados.

4.2.1. Resultados Titanio (UNS R56400)

4.2.1.1 Fase 1

En la Tabla 35, se pueden observar que los valores permanecen constantes, tanto en la media, media de la envolvente diferencia y valor máximo a lo largo de los mecanizados, a diferencia de en CFRP, que se podía observar un aumento de las fuerzas, los datos de la Tabla 35 serán representados en la Figura 89.

Tabla 35: 1_HM_Ti_80_15_0.5_C

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	41.620 N	42.848 N	43.062 N
Media Envolvente	56.404 N	57.892 N	57.921 N
Valor Máximo	64.829 N	68.523 N	68.407 N
Diferencia Envolvente - Media	14.783 N	15.044 N	14.859 N

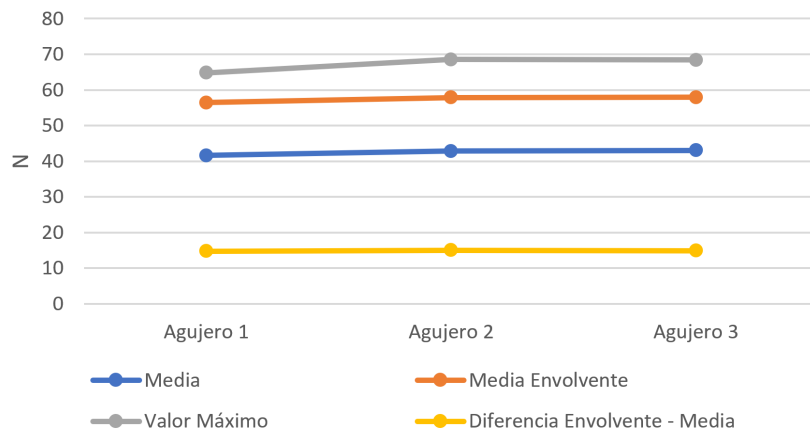


Figura 89: Gráfica tabla de datos 1_HM_Ti_80_15_0.5_C

En la Figura 90, se puede ver como se ve los datos de fuerza representados a lo largo del mecanizado, como se puede observar el mecanizado permanece constante, sin grandes oscilaciones ni amplitudes. Se puede observar perfectamente como a los 5 mm, la herramienta ya ah terminado de mecanizar y la señal está completamente estabilizada. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 80$ (m/min), $f_{zt} = 0.015$ (mm/z), $f_{za} = 0.0005$ (mm/z) y sentido horario.

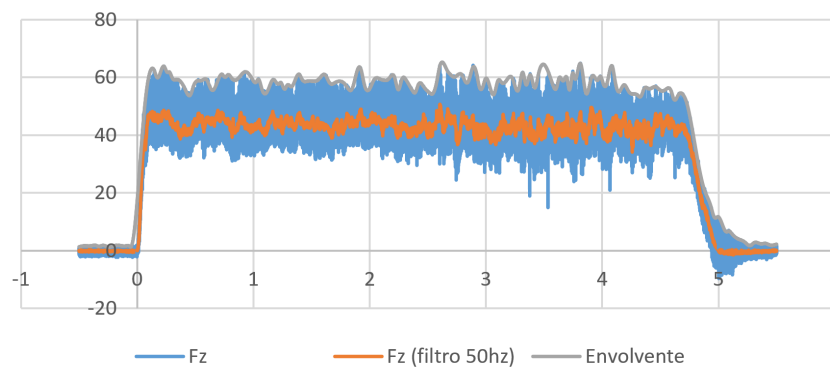


Figura 90: Gráfica 1_1HM_Ti_80_15_0.5_C

En la Tabla 36, se puede observar como al igual que pasaba antes los valores se mantienen muy constantes a lo largo de los diferentes mecanizados, se puede observar como han aumentado los valores de las fuerzas con respecto a los valores de la Tabla 35. Por último comentar que estos valores realmente no corresponden a los agujeros 1, 2, 3 sino al 4, 5, 6 debido a que al realizar los primeros mecanizados se produjeron errores de vibraciones por una mala sujeción de la probeta, al ser los valores tan constantes, no se vio necesario repetir los mecanizados con una herramienta nueva, para el estudio se han considerado como el 1, 2, 3. Los datos de la Tabla 36 serán representados en la Figura 91.

Tabla 36: 2_HM_Ti_160_15_0.5_O

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	50.356 N	48.757 N	50.115 N
Media Envolvente	72.350 N	67.777 N	69.823 N
Valor Máximo	83.435 N	86.464 N	92.162 N
Diferencia Envolvente - Media	21.994 N	19.013 N	19.708 N

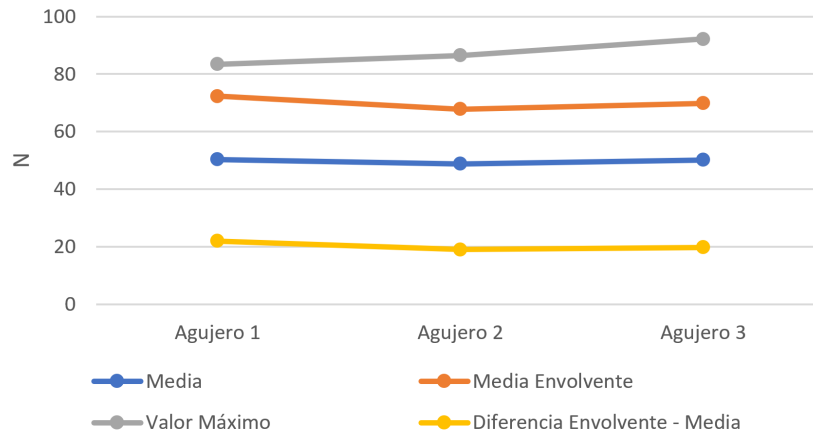


Figura 91: Gráfica tabla de datos 2_HM_Ti_160_15_0.5_O

En la Figura 92, al igual que pasaba antes, los valores de fuerza permanecen muy constantes, sin grandes oscilaciones, destacar que a diferencia de lo que ocurría en CFRP, los ensayos realizados en sentido antihorario terminan en 5 mm. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 160$ (m/min), $f_{zt} = 0.015$ (mm/z), $f_{za} = 0.0005$ (mm/z) y sentido antihorario.

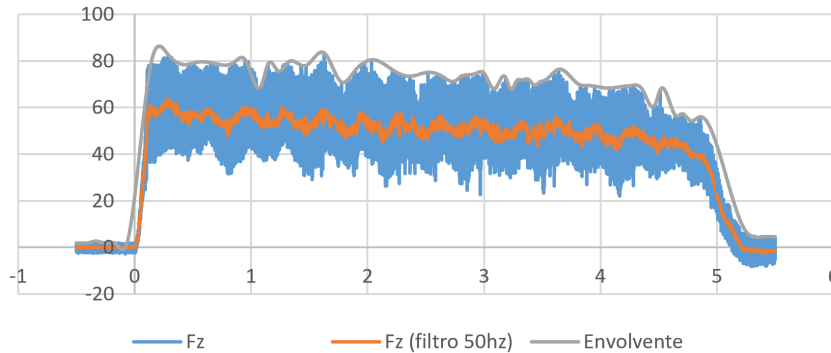


Figura 92: Gráfica 2_1HM_Ti_160_15_0.5_O

En la Tabla 37, se puede observar, como en todas las tablas de datos vista hasta el momento, que los valores permanecen constantes a lo largo de los mecanizados. Los datos de la Tabla 37 serán representados en la Figura 93.

Tabla 37: 3_HM_Ti_80_30_0.5_O

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	51.181 N	51.703 N	51.100 N
Media Envolvente	66.005 N	66.405 N	66.057 N
Valor Máximo	77.150 N	78.860 N	79.582 N
Diferencia Envolvente - Media	14.823 N	14.702 N	14.956 N

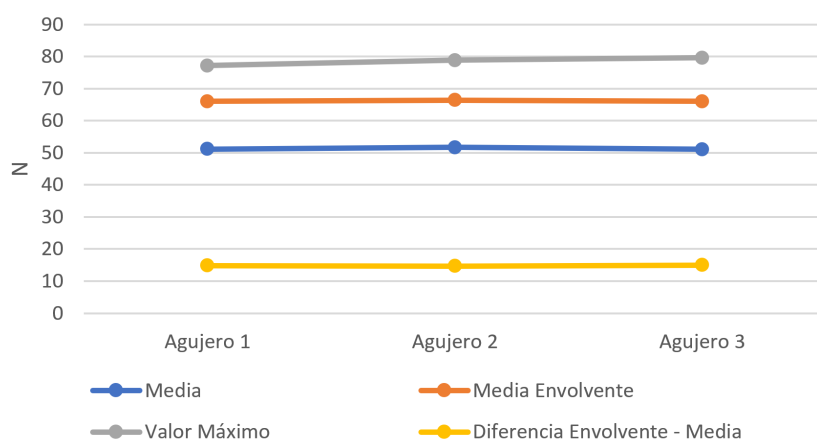


Figura 93: Gráfica tabla de datos 3_HM_Ti_80_30_0.5_O

En la Figura 94, al igual que pasaba antes, los valores de fuerza permanecen muy constantes, destacar que en esta gráfica a diferencia de antes, se pueden ver mas oscilaciones, el mecanizado finaliza a los 5 mm, aunque tarda un poco más en estabilizarse la señal. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 80$ (m/min), $f_{zt} = 0.030$ (mm/z), $f_{za} = 0.0005$ (mm/z) y sentido antihorario.

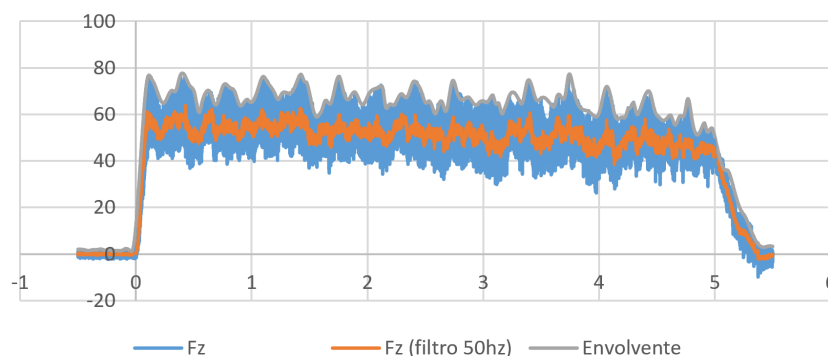


Figura 94: Gráfica 3_1HM_Ti_80_30_0.5_O

En la Tabla 38, a diferencia del resto, solo se observa un agujero, esto es debido a que durante este mecanizado, la herramienta se rompió en el mm 3.95, los valores obtenidos hasta este instante son normales y no indican que se vaya a producir esta incidencia, no se representa una gráfica de evolución debido a que no hay más mecanizados, en la Figura 95 se puede observar como el mecanizado hasta el instante 3.95 mm parece normal, es en este instante donde se produce un incremento en los valores de fuerza y se rompe la herramienta. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 160$ (m/min), $f_{zt} = 0.030$ (mm/z), $f_{za} = 0.0005$ (mm/z) y sentido horario.

Tabla 38: 4_HM_Ti_160_30_0.5_C

Datos	Agujero 1	Hasta 3.95 mm
Media	42.332 N	39.462 N
Media Envolvente	60.884 N	52.985 N
Valor Máximo	125.026 N	64.423 N
Diferencia Envolvente - Media	18.552 N	13.522 N

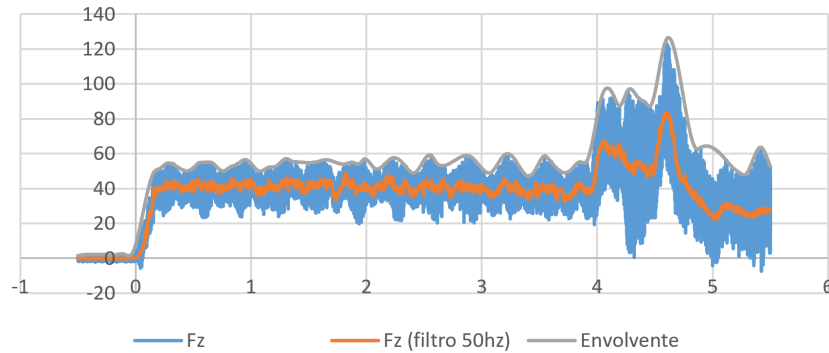


Figura 95: Gráfica 4_1HM_Ti_160_30_0.5_O

En la Tabla 39, se puede observar los valores permanecen constantes a lo largo de los mecanizados. Destacar también que al igual que ocurrió anteriormente los primeros mecanizados realizados se tuvieron que descartar por un error en la fijación de la probeta, estos resultados realmente corresponden al agujero 4, 5, 6 de igual forma que antes se considerarán para el estudio como 1, 2, 3. Los datos de la Tabla 39 serán representados en la Figura 96.

Tabla 39: 5_HM_Ti_80_15_1_O

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	41.507 N	42.947 N	43.691 N
Media Envolvente	56.829 N	57.727 N	58.892 N
Valor Máximo	67.808 N	72.412 N	71.141 N
Diferencia Envolvente - Media	15.321 N	14.780 N	15.200 N

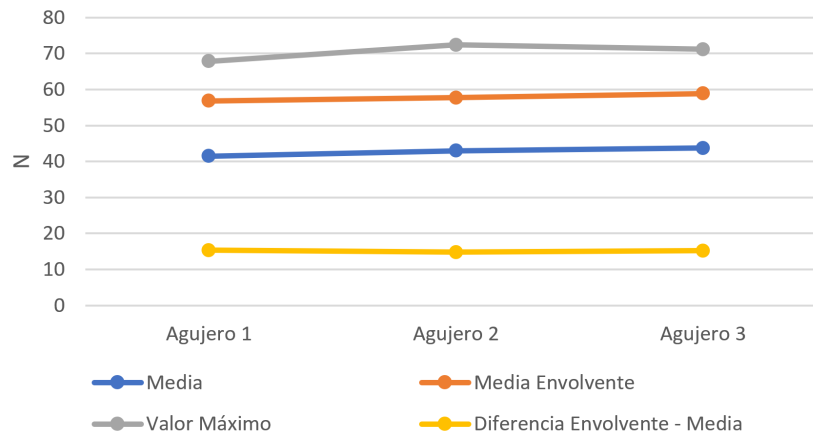


Figura 96: Gráfica tabla de datos 5_HM_Ti_80_15_1_O

En la Figura 97, se puede observar como al principio del mecanizado la amplitud de la señal de F_z es entorno a 20 N, y cuando está finalizando el mecanizado es el doble. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 80$ (m/min), $f_{zt} = 0.015$ (mm/z), $f_{za} = 0.001$ (mm/z) y sentido antihorario.

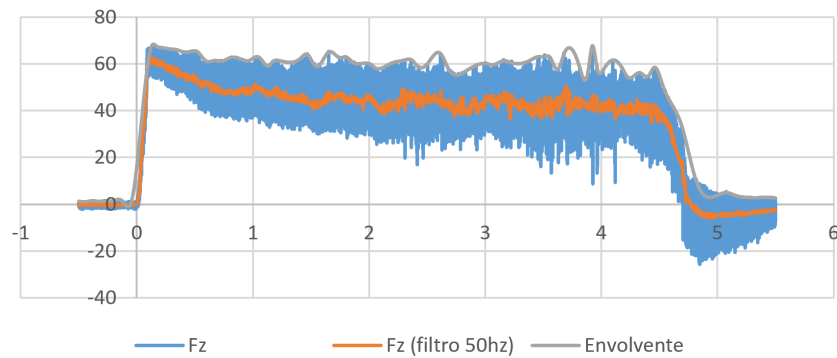
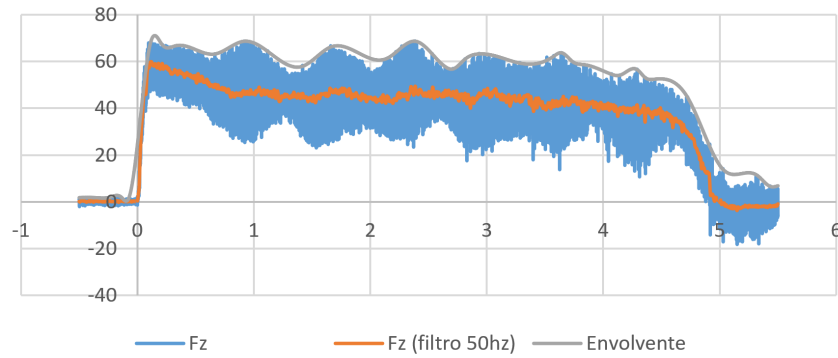


Figura 97: Gráfica 5_1HM_Ti_80_15_1_O

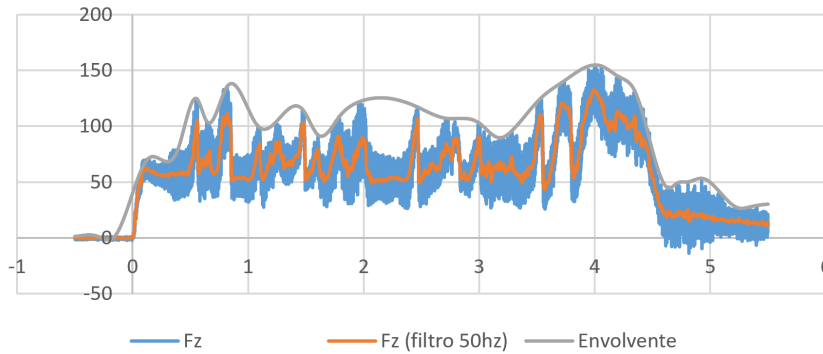
En la Tabla 40, se puede observar únicamente 2 agujeros, debido a que la herramienta en el 2 agujero se rompe. Nuevamente, sin mostrar ningún aviso, los valores del primer agujero son normales comparados con el resto de mecanizados. En la Figura 98 se pueden observar las dos gráficas correspondiente, en la figura (a), se puede observar como la gráfica es normal y similar a la de otros parámetros, sin embargo en la figura (b) solo tarda 0.5 mm en comenzar a incrementar la fuerza hasta que la herramienta rompe y el fresado termina. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 160$ (m/min), $f_{zt} = 0.015$ (mm/z), $f_{za} = 0.001$ (mm/z) y sentido horario.

Tabla 40: 6_HM_Ti_160_15_1_C

Datos	Agujero 1	Agujero 2
Media	43.095 N	66.862 N
Media Envolvente	59.295 N	106.819 N
Valor Máximo	68.749 N	153.902 N
Diferencia Envolvente - Media	16.200 N	39.956 N



(a) Corrida 1, 6_1HM_Ti_160_15_1_C.



(b) Corrida 2, 6_2HM_Ti_160_15_1_C.

Figura 98: Gráficas 6_HM_Ti_160_15_1_C.

En la Tabla 41, se puede observar que los valores permanecen constantes a lo largo de los mecanizados. Destacar también que al igual que ocurrió anteriormente los primeros mecanizados realizados se tuvieron que descartar por un error en la fijación de la probeta, estos resultados realmente corresponden al agujero 4, 5, 6 de igual forma que antes se considerarán para el estudio como 1, 2, 3. Los datos de la Tabla 41 serán representados en la Figura 99, no se representará la gráfica debido a que es muy similar a las representadas anteriormente. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 80$ (m/min), $f_{zt} = 0.03$ (mm/z), $f_{za} = 0.001$ (mm/z) y sentido horario.

Tabla 41: 7_HM_Ti_80_30_1_C

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	51.995 N	50.950 N	52.054 N
Media Envolvente	68.072 N	67.480 N	69.158 N
Valor Máximo	78.115 N	80.163 N	79.423 N
Diferencia Envolvente - Media	16.077 N	16.529 N	17.103 N

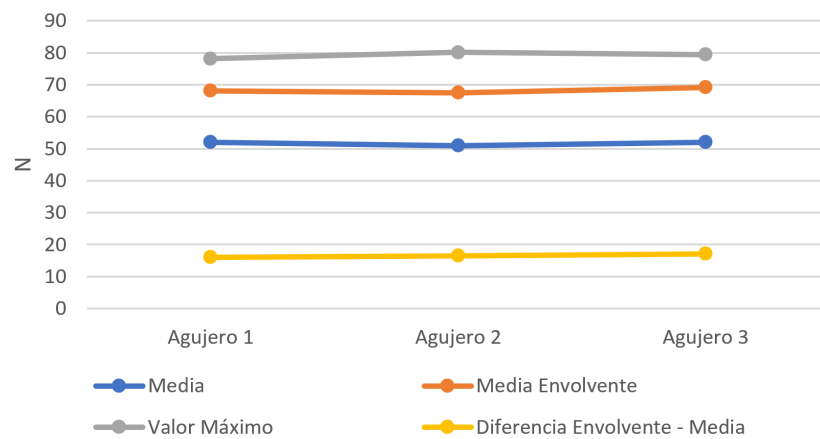


Figura 99: Gráfica tabla de datos 7_HM_Ti_80_30_1_C

En la Tabla 42, se puede observar como el valor máximo en el agujero 2 es mayor que en el 1 y el 3, estos dos últimos parecen constantes, esto es debido a que el valor máximo es solo un número, pudiéndose haber producido algún error de medida o interferencia, este valor no es indicativo de nada, como se verá mas adelante en la Figura 101. Los datos de la Tabla 42 serán representados en la Figura 100.

Tabla 42: 8_HM_Ti_160_30_1_O

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	45.516 N	45.410 N	46.365 N
Media Envolvente	64.599 N	65.827 N	65.891 N
Valor Máximo	75.663 N	113.401 N	80.633 N
Diferencia Envolvente - Media	19.082 N	20.417 N	19.525 N

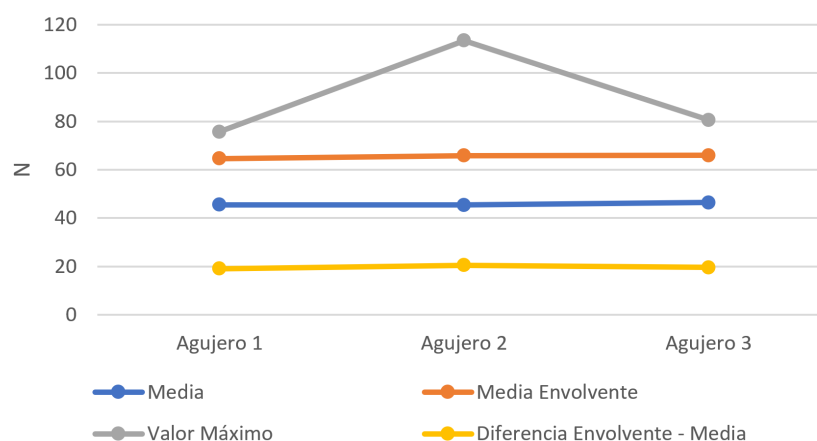


Figura 100: Gráfica tabla de datos 8_HM_Ti_160_30_1_C

En la Figura 101 se puede observar como al principio hay un pico, esto puede ser debido a un error producido por alguna interferencia de la señal, debido a que este valor no sigue ninguna tendencia y por lo cual no es significativo. De igual modo que en las anteriores, el mecanizado finaliza a los 5 mm. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 160$ (m/min), $f_{zt} = 0.03$ (mm/z), $f_{za} = 0.001$ (mm/z) y sentido antihorario.

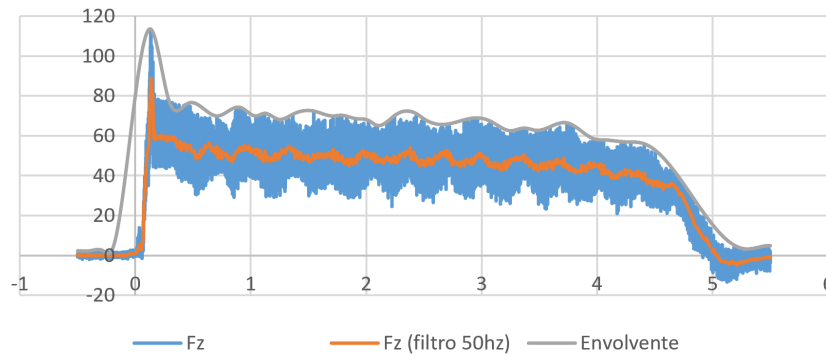


Figura 101: Gráfica 8_2HM_Ti_160_30_1_O

En la Tabla 43, se puede ver que existe un aumento de la F_z media en el primer mecanizado, esto se refleja en una disminución de la diferencia entre la envolvente - media, ya que la media de la envolvente si se mantiene constante al resto de mecanizados, en el segundo mecanizado el valor de la media descende, y se mantiene constante en el mecanizado 3. Los datos de la Tabla 43 serán representados en la Figura 102.

Tabla 43: 9_HM_Ti_120_22.5_0.75_C

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	52.025 N	47.577 N	48.159 N
Media Envolvente	70.509 N	71.852 N	72.423 N
Valor Máximo	81.171 N	83.355 N	87.963 N
Diferencia Envolvente - Media	18.483 N	24.274 N	24.263 N

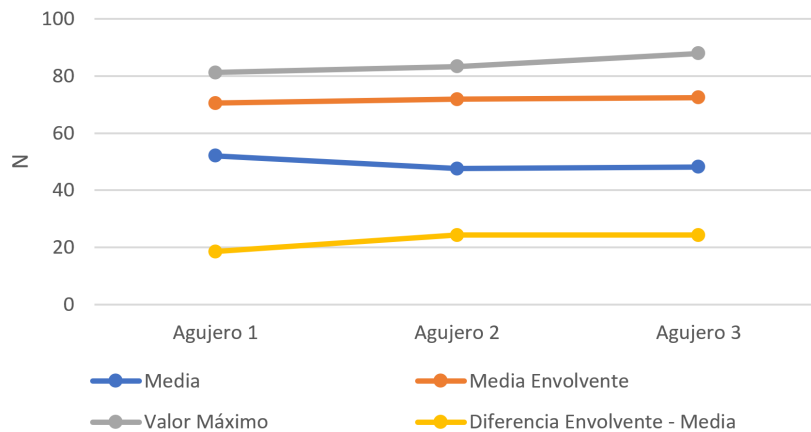
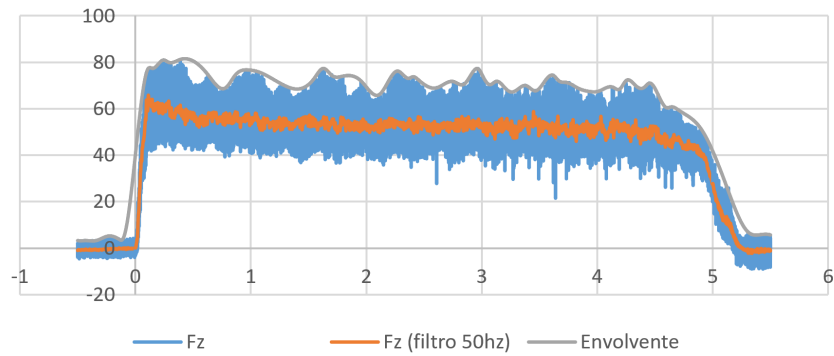
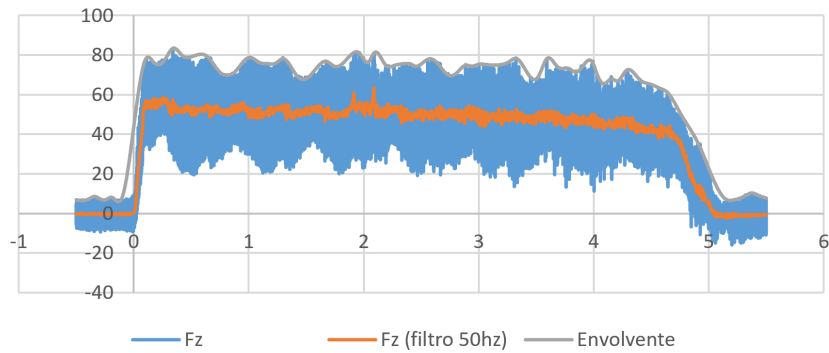


Figura 102: Gráfica tabla de datos 9_HM_Ti_120_22.5_0.75_C

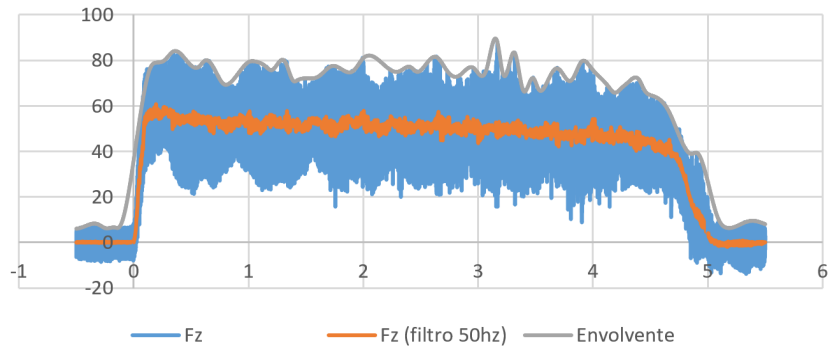
En la Figura 103 se pueden ver representados los 3 mecanizados. En la figura (a), vemos el primer agujero, es una gráfica muy similar a las ya presentadas, la amplitud de la señal F_z es entorno a 40 N. EN la figura (b) y (c) se observan los agujeros 2 y 3 en los cuales se puede observar un gran incremento de la amplitud, siendo ahora de 60 N debido a vibraciones producidas durante el mecanizado. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 120$ (m/min), $f_{zt} = 0.0225$ (mm/z), $f_{za} = 0.00075$ (mm/z) y sentido horario.



(a) Corrida 1, 9_1HM_Ti_120_22.5_0.75_C



(b) Corrida 2, 9_2HM_Ti_120_22.5_0.75_C



(c) Corrida 3, 9_3HM_Ti_120_22.5_0.75_C

Figura 103: Gráficas 9_HM_Ti_120_22.5_0.75_C.

En la Tabla 44, se observa exactamente lo mismo que antes, se puede ver que existe un aumento de la F_z media en el primer mecanizado, esto se refleja en una disminución de la diferencia entre la envolvente - media, ya que la media de la envolvente si se mantiene constante al resto de mecanizados, en el segundo mecanizado el valor de la media desciende, y se mantiene constante en el mecanizado 3. Los datos de la Tabla 44 serán representados en la Figura 104.

Tabla 44: 10_HM_Ti_120_22.5_0.75_O

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	52.098 N	46.607 N	47.127 N
Media Envolvente	70.776 N	72.749 N	72.387 N
Valor Máximo	81.342 N	84.923 N	85.309 N
Diferencia Envolvente - Media	18.677 N	26.141 N	25.260 N

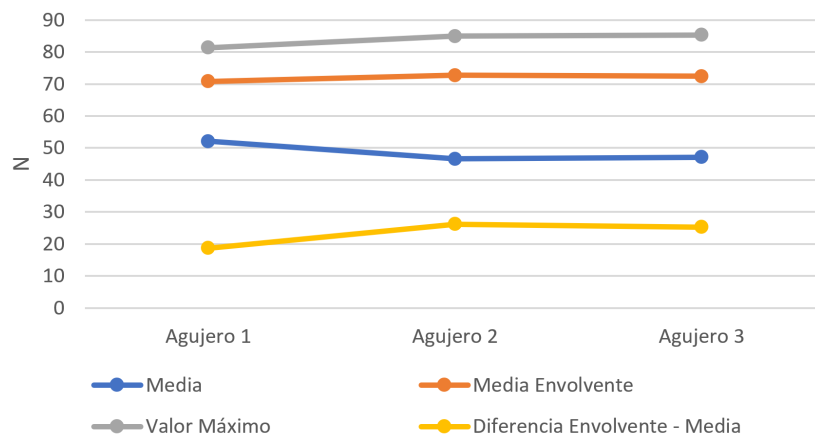


Figura 104: Gráfica tabla de datos 10_HM_Ti_120_22.5_0.75_C

De la misma forma que pasaba antes, en la Figura 105 se puede observar como en el primer mecanizado la amplitud es de 40 N y en el 2 y 3 es de 60 N, este aumento es debido a las vibraciones producidas durante el mecanizado, también en la figura (b) y (c) se puede observar un patrón en la distribución de los picos, separados cada 0.35 mm aproximadamente, de la señal F_z , este patrón no se había podido observar en las gráficas anteriores.

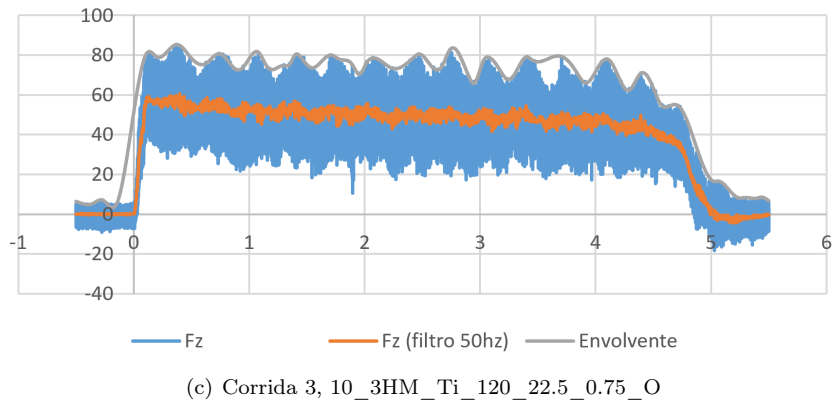
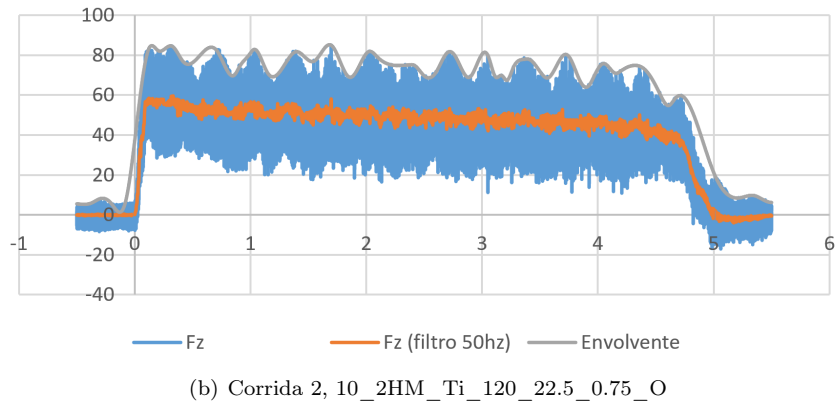
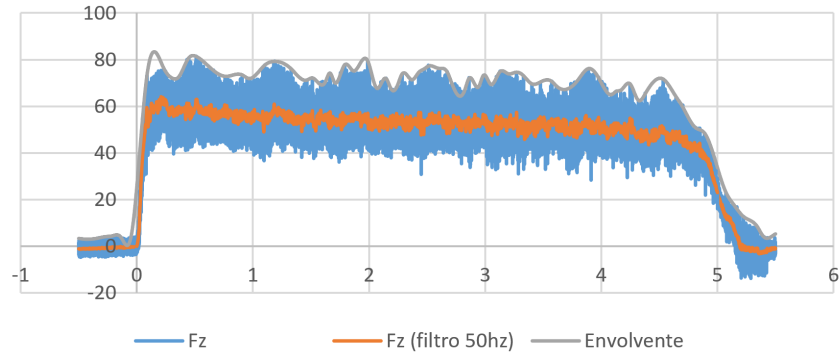


Figura 105: Gráficas 10_HM_Ti_120_22.5_0.75_O.

4.2.1.2 Resultados evolución

En la Figura 106 se representa la F_z media a lo largo de los diferentes agujeros y fresados realizados. Los datos se han ordenado en función del sentido de giro, primero se han puesto los valores correspondientes a concordancia y después los realizados en oposición. En primer momento se observa que el sentido de giro parece no ser influyente puesto que no parece existir un patrón. Se puede observar que para el primer agujero la F_z media es mayor en oposición. Sin embargo también se observa que todas las herramientas rotas se han producido en concordancia.

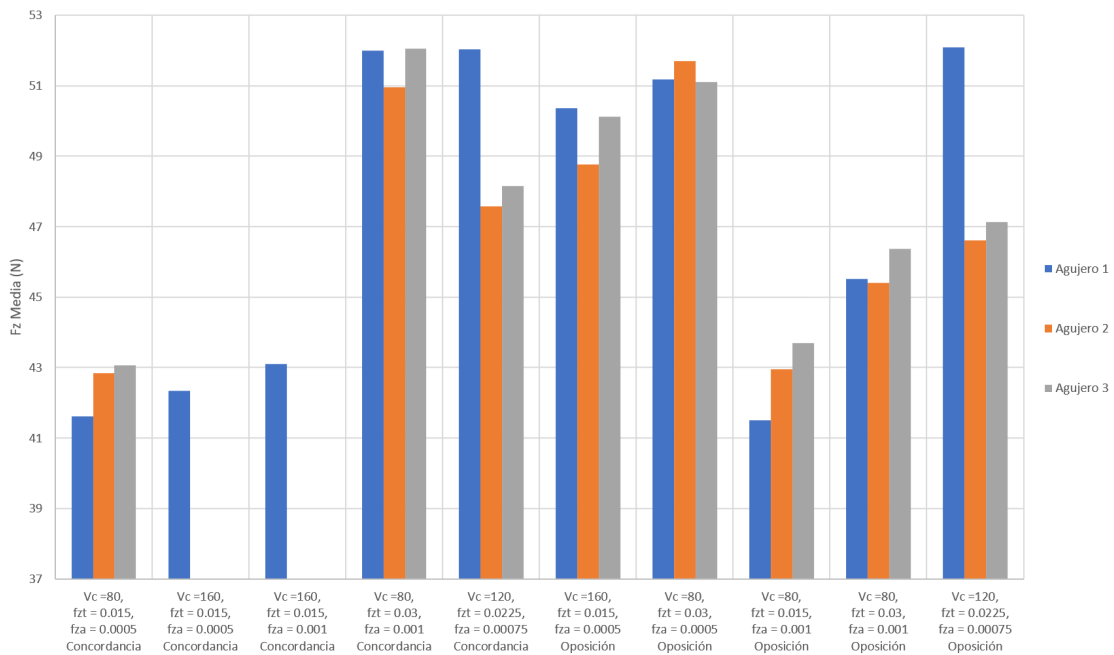


Figura 106: Evolución de la media a lo largo de los fresados y con las distintos agujeros en titanio.

4.2.1.3 Fase 2

En la fase 2, se realizarán todos los ensayos en concordancia, eliminado el sentido de giro de los factores. También se repitiera el ensayo 6.

Antes de realizar la fase 2, se ha vuelto a realizar el mecanizado 6. Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 160$ (m/min), $f_{zt} = 0.015$ (mm/z), $f_{za} = 0.001$ (mm/z) y sentido horario. Debido a que los resultados obtenidos en la primera corrida eran razonables. Se ha vuelto a obtener el mismo efecto, el primer mecanizado lo realiza correctamente, pero en el segundo después de 0.5 mm empieza a incrementar las fuerzas y se rompe la herramienta, por lo cual se descarta que error haya sido aleatorio. En la Tabla 45 se observan los datos obtenidos en este nuevo ensayo.

Tabla 45: 6_HM_Ti_160_15_1_C

Datos	Agujero 1	Agujero 2
Media	42.982 N	66.863 N
Media Envolvente	60.442 N	106.819 N
Valor Máximo	68.510 N	153.902 N
Diferencia Envolvente - Media	17.459 N	39.955 N

En la Tabla 46, se puede observar como al igual que pasaba en la fase 1, los valores se mantienen muy constantes a lo largo de los diferentes mecanizados, se puede observar como han disminuido los valores de las fuerzas con respecto a los valores de la Tabla 36, en oposición. Los datos de la Tabla 46 serán representados en la Figura 107.

Tabla 46: 2_HM_Ti_160_15_0.5_C

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	47.741 N	47.521 N	48.036 N
Media Envolvente	63.001 N	65.204 N	65.670 N
Valor Máximo	73.681 N	82.029 N	81.695 N
Diferencia Envolvente - Media	15.260N	17.683 N	17.634 N

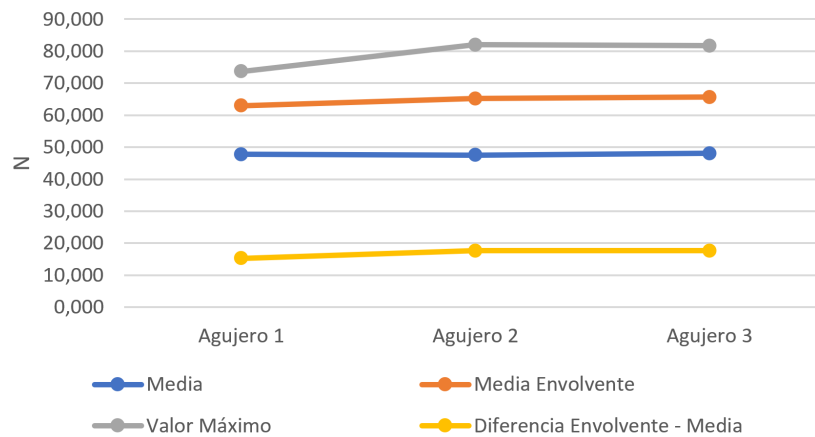


Figura 107: Gráfica tabla de datos 2_HM_Ti_160_15_0.5_C

En la Tabla 47, se puede observar como al igual que pasaba en la fase 1, los valores se mantienen muy constantes a lo largo de los diferentes mecanizados, se puede observar como han disminuido los valores de las fuerzas con respecto a los valores de la Tabla 37, en oposición. Los datos de la Tabla 47 serán representados en la Figura 108.

Tabla 47: 3_HM_Ti_80_30_0.5_C

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	43.442 N	43.965 N	44.939 N
Media Envolvente	57.553 N	58.866 N	59.953 N
Valor Máximo	70.682 N	73.130 N	75.484 N
Diferencia Envolvente - Media	14.111 N	14.901 N	15.014 N

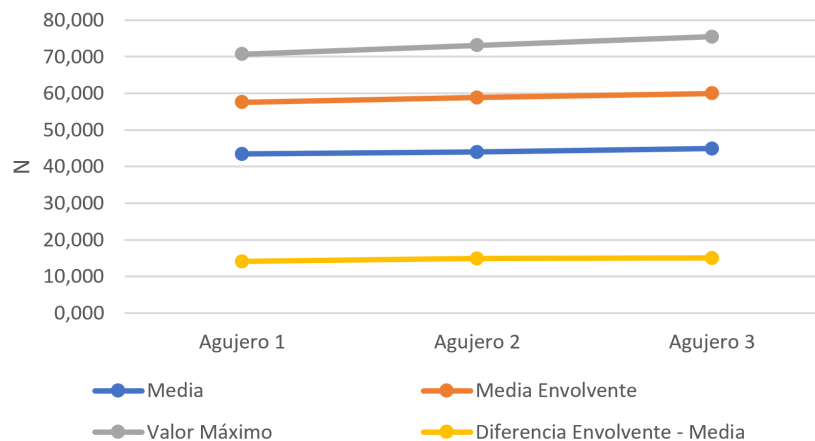


Figura 108: Gráfica tabla de datos 3_HM_Ti_80_30_0.5_C

En la Tabla 48, se puede observar como al igual que pasaba en la fase 1, los valores se mantienen muy constantes a lo largo de los diferentes mecanizados, se puede observar como han aumentado los valores de las fuerzas con respecto a los valores de la Tabla 39, en oposición. Los datos de la Tabla 48 serán representados en la Figura 109.

Tabla 48: 5 HM Ti 80 15 1 C

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	50.631 N	50.518 N	50.949 N
Media Envolvente	61.512 N	62.277 N	63.248 N
Valor Máximo	76.752 N	78.333 N	79.350 N
Diferencia Envolvente - Media	10.881 N	11.759 N	12.298 N

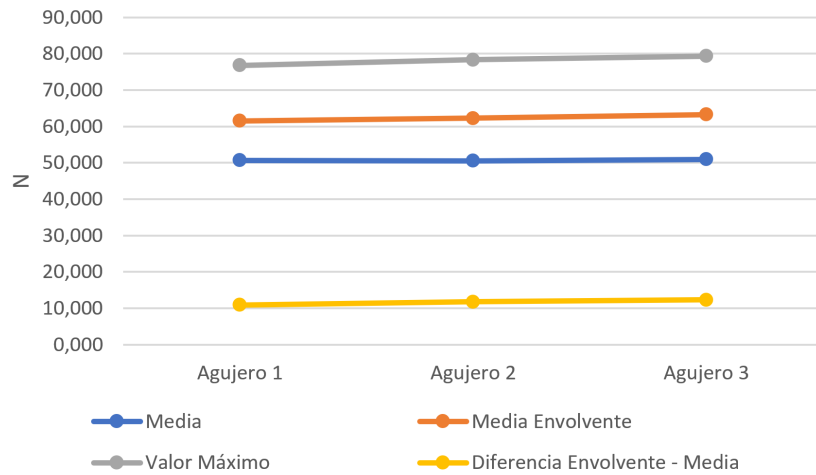
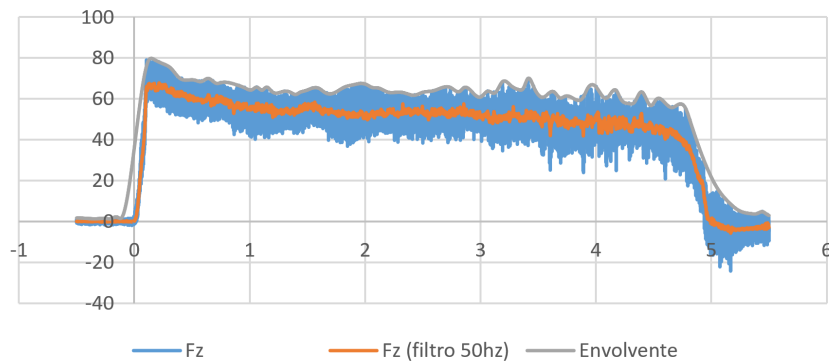
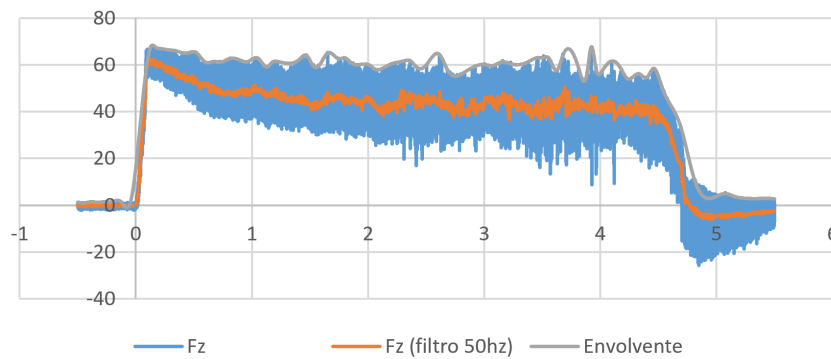


Figura 109: Gráfica tabla de datos 5_HM_Ti_80_15_1_C

En la Figura 110, se muestran la gráfica de la fase 1 y 2 para los parámetros: $V_c = 80$ (m/min), $f_{zt} = 0.015$ (mm/z), $f_{za} = 0.001$ (mm/z) y sentido horario y antihorario. Se puede observar como la amplitud de F_z en la gráfica en sentido horario es menor que en sentido antihorario. La gráfica en sentido antihorario finaliza antes el mecanizado que la que se encuentra en sentido horario.



(a) Corrida 3, 5_3HM_Ti_80_15_1_C.



(b) Corrida 3, 5_3HM_Ti_80_15_1_O.

Figura 110: Gráficas fase 1 y 3, 5_3HM_Ti_80_15_1_C y 5_3HM_Ti_80_15_1_O.

En la Tabla 49, se puede observar como al igual que pasaba en la fase 1, los valores se mantienen muy constantes a lo largo de los diferentes mecanizados, se puede observar como han aumentado los valores de las fuerzas con respecto a los valores de la Tabla 42, en oposición. Los datos de la Tabla 49 serán representados en la Figura 111.

Tabla 49: 8_HM_Ti_160_30_1_C

Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	50.555 N	52.124 N	53.039 N
Media Envolvente	74.594 N	77.397 N	76.315 N
Valor Máximo	89.144 N	92.314 N	89.615 N
Diferencia Envolvente - Media	24.038 N	25.273 N	23.275 N

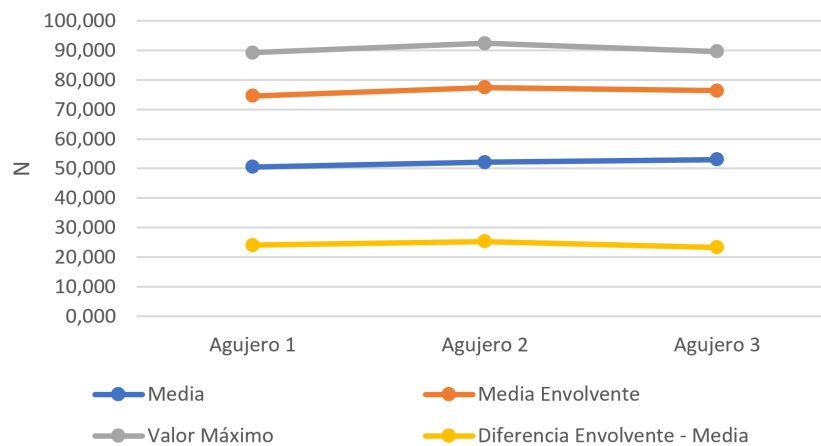


Figura 111: Gráfica tabla de datos 8_HM_Ti_160_30_1_C

4.2.1.4 Resultados evolución

En la Figura 112 se puede observar la fase 1 y 2 en función de la media. En esta gráfica se puede observar como el sentido de giro tiene importancia con respecto a los valores de fuerza obtenidos. Los resultados obtenidos en concordancia parecen un reflejo de los obtenidos en oposición.

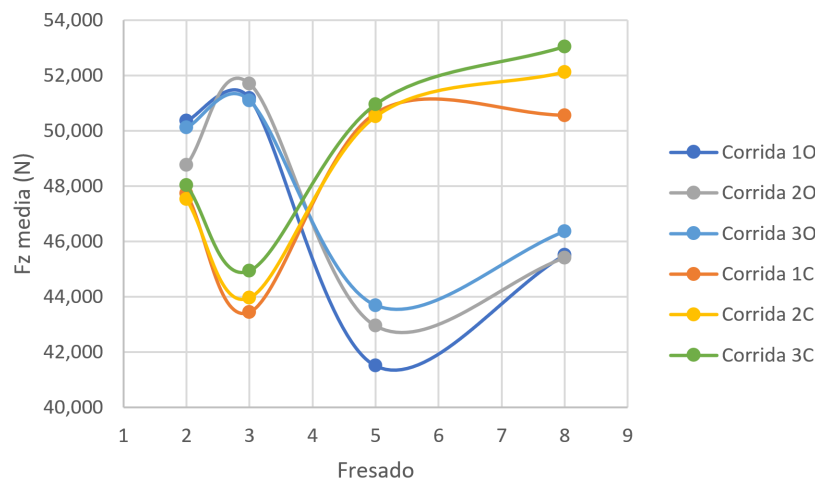


Figura 112: Comparación fase 1 y 2 media.

En la Figura 113 se puede observar la fase 1 y 2 en función de la media de la envolvente. En esta gráfica se puede observar como el sentido de giro desplaza los resultados obtenidos, tanto en oposición como en concordancia describen una curvatura con una tendencia ascendente.

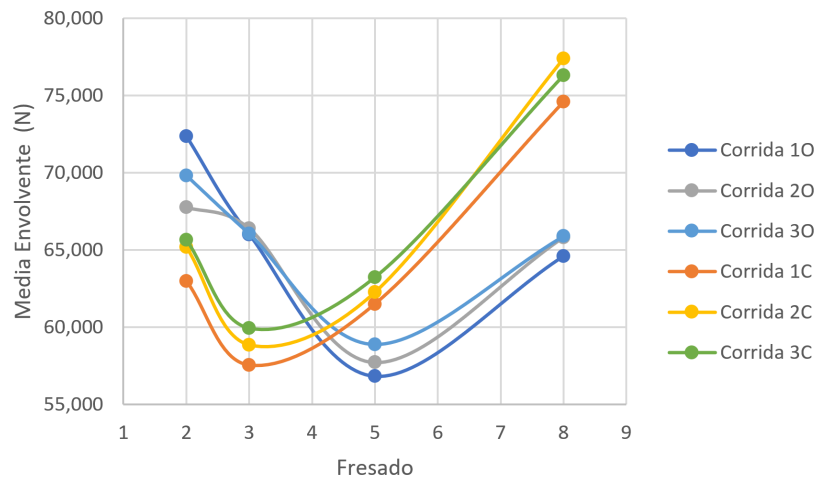


Figura 113: Comparación fase 1 y 2 envolvente.

4.2.1.5 Ensayo de Vida

En Titanio, se ha podido ver tanto en la fase 1 como en la fase 2, la diferencia entre las diferentes corridas es prácticamente despreciable, es por eso que se ha realizado un estudio de vida de la herramienta, para poder observar como evoluciona la herramienta a lo largo de muchos mecanizados. Para este ensayo de vida se han cogido los parámetros Este mecanizado corresponde a los parámetros: $V_c = 80$ (m/min), $f_{zt} = 0.015$ (mm/z), $f_{za} = 0.001$ (mm/z) y sentido horario. Correspondientes a 5_HM_Ti_80_15_1_C.

En la Tabla 50 se muestran todos los valores obtenidos durante este proceso, en esta tabla se puede observar la media, la media de la envolvente, el valor máximo, la diferencia entre la envolvente y la media y por último dos parámetros de calidad, R_a y R_z . En estos datos se puede observar como existe un incremento en las fuerzas, de 10 N entre el agujero 5 y 72, una diferencia bastante pequeña comparada con lo que ocurría en CFRP. Se puede comprobar como la diferencia entre la envolvente y la media permanece constante, y como este aumento en las fuerzas se observa también en los parámetros de calidad analizados R_a y R_z .

Agujero	Media	Media Envolvente	Valor Máximo	Envolvente - Media	Ra	Rz
5	53.563 N	65.516 N	76.816 N	11.953 N	0.18	1.3
6	53.919 N	66.351 N	80.841 N	12.432 N	0.15	1.09
7	54.124 N	66.667 N	81.702 N	12.543 N	0.16	1.17
8	54.090 N	68.760 N	84.133 N	14.670 N	0.16	1.1
9	-	-	-	-	0.17	1.15
10	53.967 N	69.183 N	87.082 N	15.216 N	0.19	1.3
11	54.342 N	68.026 N	81.193 N	13.684 N	0.18	1.28
12	54.791 N	68.543 N	83.339 N	13.752 N	0.17	1.26
13	55.327 N	69.529 N	82.540 N	14.202 N	0.17	1.28
14	55.597 N	69.456 N	82.561 N	13.859 N	0.19	1.25
15	55.673 N	68.435 N	82.610 N	12.763 N	0.16	1.26
16	55.596 N	69.333 N	83.606 N	13.737 N	0.15	1.11
17	55.617 N	69.216 N	82.427 N	13.599 N	0.14	1.23
18	54.799 N	68.160 N	79.906 N	13.361 N	0.15	1.16
19	55.760 N	69.923 N	83.116 N	14.163 N	0.16	1.09
20	55.270 N	69.956 N	85.013 N	14.686 N	0.17	1.34
21	54.895 N	68.126 N	80.720 N	13.231 N	0.17	1.31
22	55.638 N	69.392 N	84.916 N	13.754 N	0.16	1.15
23	55.710 N	68.740 N	83.718 N	13.030 N	0.18	1.42
24	55.733 N	69.259 N	85.038 N	13.526 N	0.16	1.06
25	56.005 N	69.836 N	83.837 N	13.832 N	0.16	1.16

26	55.703 N	70.431 N	91.190 N	14.728 N	0.17	1.29
27	55.023 N	67.900 N	81.925 N	12.878 N	0.17	1.25
28	55.281 N	68.473 N	84.358 N	13.192 N	0.18	1.28
29	55.261 N	68.721 N	85.386 N	13.460 N	0.16	1.41
30	54.419 N	67.851 N	83.655 N	13.432 N	0.16	1.21
31	54.901 N	69.069 N	83.984 N	14.168 N	0.18	1.23
32	54.588 N	68.689 N	84.099 N	14.101 N	0.18	1.43
33	55.854 N	68.761 N	84.361 N	12.907 N	0.18	1.84
34	55.203 N	67.605 N	83.650 N	12.402 N	0.17	1.17
35	55.713 N	69.463 N	86.655 N	13.750 N	0.19	1.43
36	55.749 N	69.547 N	84.735 N	13.798 N	0.18	1.19
37	55.848 N	70.755 N	85.602 N	14.907 N	0.17	1.47
38	55.308 N	69.275 N	83.412 N	13.967 N	0.15	1.18
39	55.158 N	68.497 N	80.534 N	13.338 N	0.24	1.51
40	55.511N	69.235 N	82.475 N	13.725 N	0.16	1.15
41	55.938 N	70.542 N	85.276 N	14.604 N	0.15	1.12
42	55.508 N	70.998 N	86.728 N	15.491 N	0.15	1.12
43	55.242 N	70.379 N	85.234 N	15.138 N	0.16	1.43
44	55.740 N	71.774 N	86.645 N	16.034 N	0.17	1.32
45	56.241 N	70.650 N	85.006 N	14.409 N	0.16	1.3
46	55.332 N	68.740 N	84.324 N	13.408 N	0.18	1.46
47	56.100 N	70.371 N	86.221 N	14.272 N	0.18	1.64
48	55.480 N	70.223 N	87.029 N	14.742 N	0.16	1.33
49	56.023 N	71.282 N	87.186 N	15.259 N	0.17	1.45
50	58.620 N	72.347 N	82.944 N	13.727 N	0.45	4.1
51	59.912 N	74.068 N	82.573 N	14.156 N	0.49	4.42
52	60.056 N	73.064 N	84.752 N	13.008 N	0.27	2.33
53	59.592 N	74.349 N	84.727 N	14.757 N	0.38	3.02
54	59.873 N	74.914 N	86.005 N	15.041 N	0.47	3.78
55	59.247 N	74.190 N	84.660 N	14.944 N	0.29	2.6
56	59.256 N	73.133 N	84.074 N	13.877 N	0.46	4.25
57	59.150 N	73.002 N	83.742 N	13.852 N	0.58	6.43
58	59.629 N	73.312 N	84.979 N	13.683 N	0.49	3.62
59	60.251 N	75.526 N	87.128 N	15.275 N	0.27	2.69
60	59.407 N	73.600 N	85.217 N	14.193 N	0.19	1.91
61	60.084 N	76.013 N	90.876 N	15.929 N	0.19	1.7
62	59.751 N	73.807 N	83.578 N	14.056 N	0.43	3.79
63	59.465 N	74.530 N	86.467 N	15.065 N	0.5	3.9
64	60.208 N	75.175 N	86.482 N	14.967 N	0.4	3.72
65	59.165 N	74.429 N	86.090 N	15.263 N	0.42	2.54
66	59.093 N	74.409 N	85.979 N	15.316 N	0.23	2.19
67	58.776 N	73.434 N	88.295 N	14.658 N	0.44	3.06
68	59.408 N	73.047 N	86.624 N	13.639 N	0.34	3.34
69	59.575 N	73.950 N	84.952 N	14.375 N	0.29	2.44
70	59.622 N	74.361 N	86.440 N	14.739 N	0.21	3.87
71	58.746 N	73.905 N	86.250 N	15.159 N	0.41	3.51
72	59.931 N	75.554 N	88.839 N	15.624 N	0.27	2.21

Tabla 50: Ensayo de vida herramienta

En la Figura 114 se puede ver la evolución de la media y la media de la envolvente, los 2 resultados presentan un patrón muy parecido, se puede observar como a partir del agujero 49 existe un incremento de las fuerzas. Las dos medidas se encuentran prácticamente equidistantes a lo largo de todos los mecanizados.

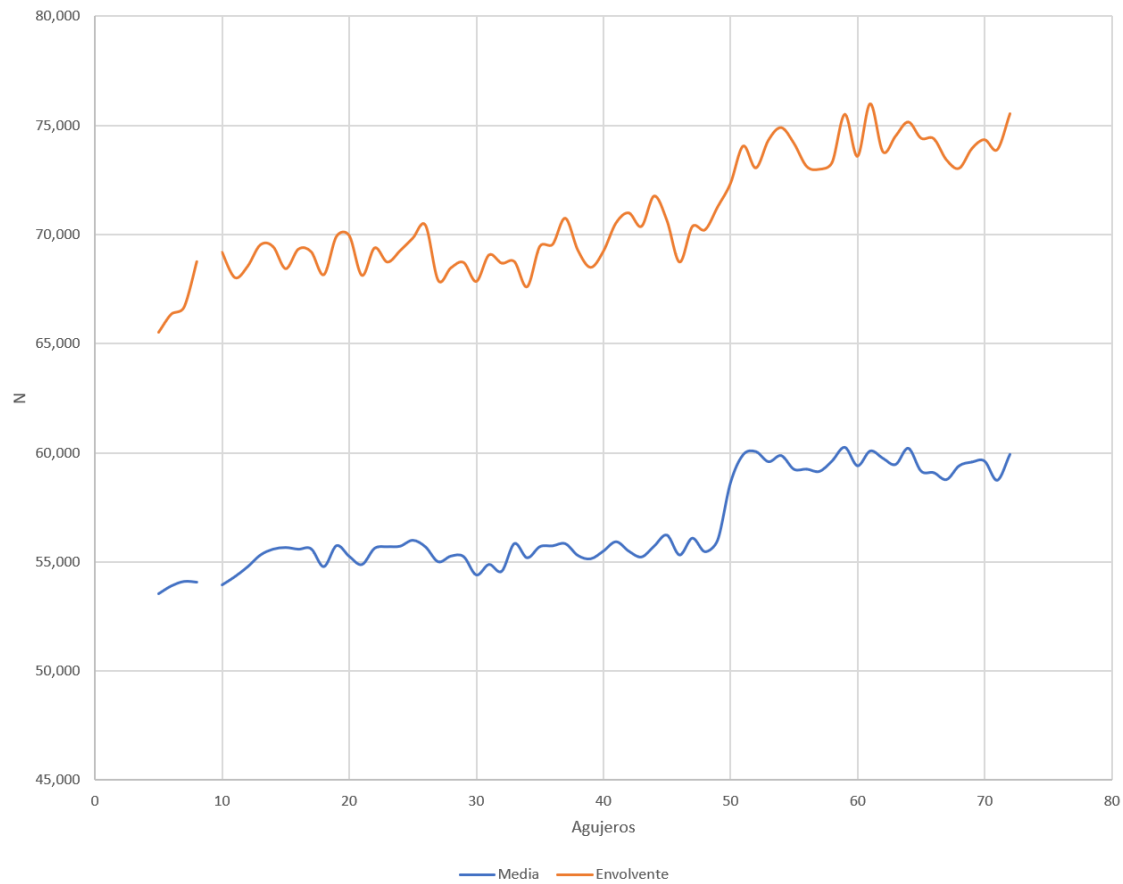


Figura 114: Evolución media y media de la envolvente, ensayo de vida Titanio

En la Figura 115 se puede observar como la media de las fuerzas está relacionada con R_a , durante los 49 primeros agujeros, R_a y la media permanecen constantes, con alguna oscilación en R_a pero rondando 0.18 para R_a y 55 N para la media. Sin embargo a partir del agujero 50, se produce rápidamente un gran incremento, este incremento es apreciable tanto en R_a como en la media, a partir de este mecanizado, R_a empieza a oscilar y no mantenerse constante como al principio. La media después del agujero 49, vuelve a estabilizarse en 60 N.

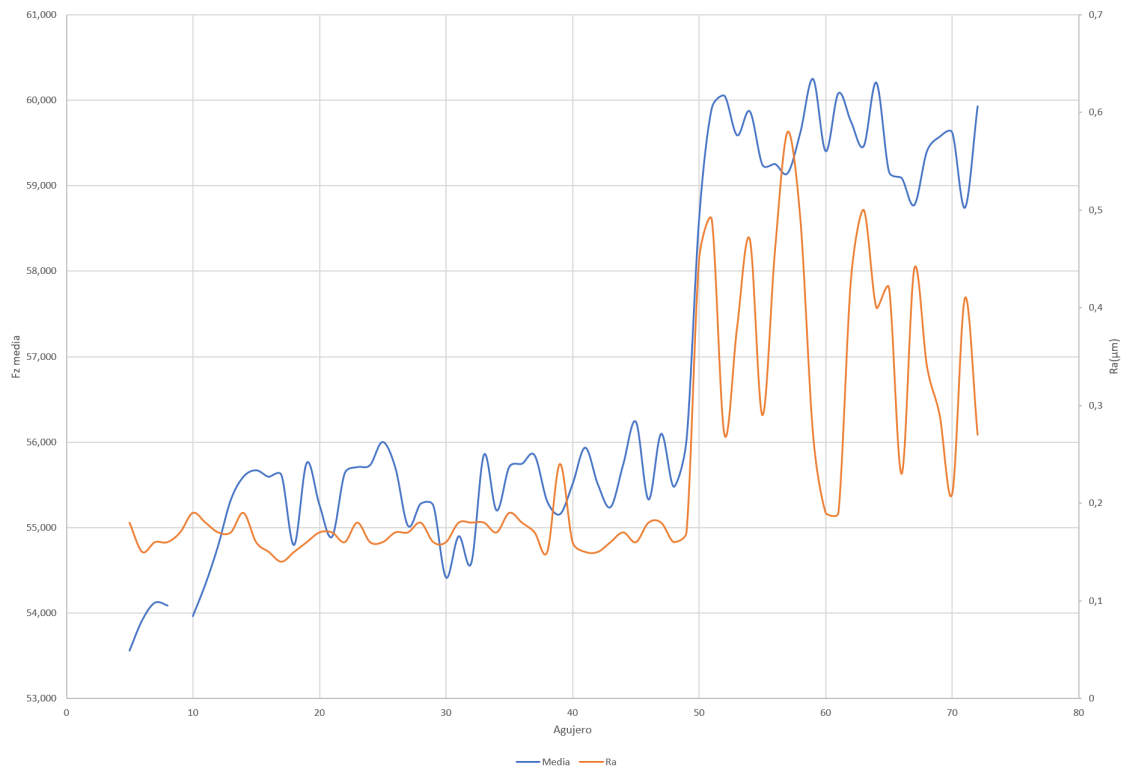
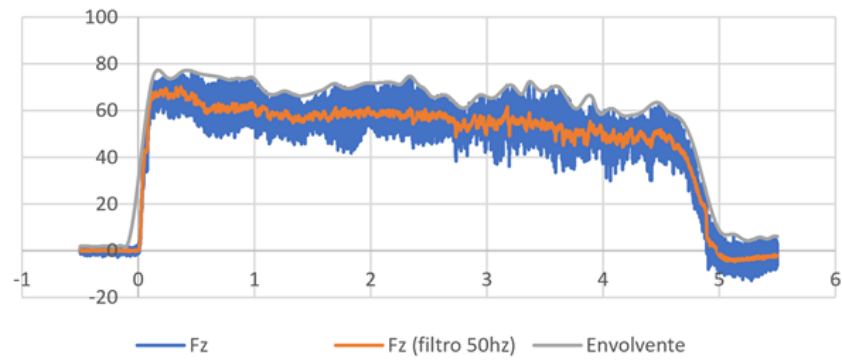
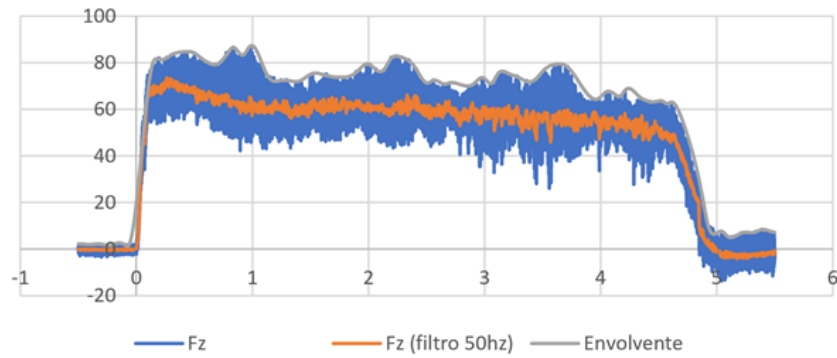


Figura 115: Evolución R_a y F_z media, ensayo de vida Titanio

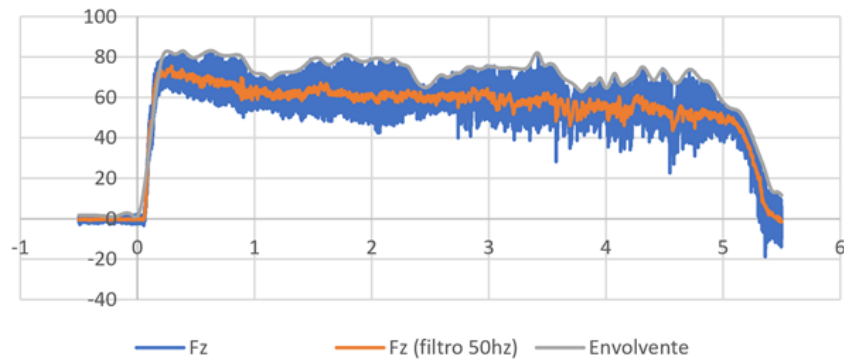
Como se ha observado en la evolución de todas las medidas, a partir del agujero 49, las medidas sufren un gran incremento. En la Figura 116 se muestran la gráfica correspondiente al agujero 1, 49, 50 y 72. En estas se puede observar como en entre la 1 y la 49, apenas hay diferencia, al igual que pasa entre la 50 y la 72. Sin embargo si se puede apreciar una diferencia entre la 49 y la 50, ya que en la 49, se puede observar como el mecanizado ha finalizado y la señal esta completamente estable, sin embargo en la gráfica 50 la herramienta tarda más en salir y la señal no termina de estabilizarse.



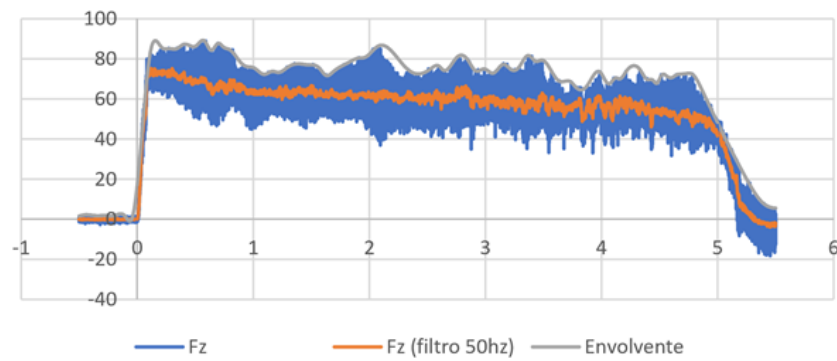
(a) Agujero 5, 5_5HM_Ti_80_15_1_C.



(b) Agujero 49, 5_49HM_Ti_80_15_1_C.



(c) Agujero 50, 5_50HM_Ti_80_15_1_C.



(d) Agujero 72, 5_72HM_Ti_80_15_1_C.

Figura 116: Gráficas vida 5_HM_Ti_80_15_1_C.

4.2.2. Conclusiones Titanio (UNS R56400)

Al igual que pasaba en CFRP, al realizar una fracción factorial, todos los datos son muy importantes por lo cual la ausencia de alguno de estos, dificulta su correcto estudio.

Se ha verificado el error del ensayo 6 en busca de una explicación por la rotura de la herramienta durante la realización del 2 agujero. Al realizarlo nuevamente se observa el mismo problema, se ha descartado un error aleatorio, por lo cual el problema proviene de los parámetros elegidos.

En la fase 2 al realizar los ensayos realizados en oposición en concordancia se ha observado un aumento de las fuerzas, aproximadamente del 27 % con respecto al valor máximo medido, por lo cual al cambiar el sentido de giro de oposición a concordancia, aumenta el valor medio de F_z .

Como se ha podido observar en el ensayo de vida, la R_a desarrolla el mismo comportamiento que las fuerzas. Por lo cual se podría decir que están relacionadas.

En Titanio, en los primeros 49 agujeros, no se observa un aumento significativo de la fuerza, sin embargo a partir del agujero 50 puede observarse un incremento del 12 %.

El ensayo de vida ha permitido observar como la diferencia entre la media y la envolvente permanece constante a lo largo del número de agujeros. El valor medio obtenido es 14.111 N.

5. Conclusión

- El objetivo del trabajo se ha conseguido, se ha podido realizar una correcta metodología de trabajo con la cual se ha podido analizar las fuerzas generadas durante el fresado helicoidal de materiales de interés aeronáutico.
- En Titanio, se podría seguir la realización del ensayo de manera online, debido a que como se ha podido observar durante el análisis de las fuerzas, la R_a sigue el mismo patrón que F_z media. Estableciendo los valores deseados de R_a se podría saber cuando la realización del agujero esta fuera de tolerancia mediante las fuerzas.
- Durante el análisis de las fuerzas, también se ha podido observar que todas las gráficas siguen una tendencia, cuando se ha producido un error durante el mecanizado, simplemente observando las gráficas se puede saber si el mecanizado ha resultado exitoso o ha habido algún fallo.
- Mientras en CFRP se observa un incremento en las fuerzas a medida que aumenta el número de agujeros, en el titanio estas fuerzas se mantienen mucho más constantes. Por lo cual, en CFRP se puede ir relacionando el estado de la herramienta con el valor de las fuerzas medidas. El desgaste en el titanio se produce de manera súbita, este hecho dificulta el seguimiento del estado de la herramienta.
- En CFRP, se observa un incremento de la influencia del parámetro f_{za} sobre F_z media a medida que aumenta el número de agujeros.
- Para investigaciones futuras sería muy importante realizar un estudio factorial completo, ya que como se ha comprobado la falta de valores afecta significativamente a la obtención de resultados, con un estudio factorial completo, se obtendrían más resultados y la pérdida de valores no resultaría tan importante. También resultaría interesante un ensayo de vida de CFRP, ya que este permitiría conocer con más exactitud, que parámetros son más estadísticamente significativos, además se podría estudiar la R_a durante este proceso.

Bibliografía

- [1] Web of science. https://apps-webofknowledge-com.bibezproxy.uca.es/CitationReport.do?product=UA&search_mode=CitationReport&SID=Dim63gwhGyzLLOArJWN&page=1&cr_pqid=6&viewType=summary, 17/03/2021.
- [2] Proceso del taladrado. <https://sites.google.com/site/procesosdemanufacturaetitic/tipos-de-procesos/proceso-de-taladrado>, 30/04/2021.
- [3] Euskal Herriko Unibertsitatea. Tema 11 : Taladrado. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao*, pages 1–17, 2010.
- [4] Laboratorio de produccion. Fresado y taladrado protocolo. *Escuela colombiana de ingeniería*, pages 1–32, 2010.
- [5] Mikell P Groover. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación, 1997.
- [6] Fresadora. <https://www.areatecnologia.com/herramientas/fresadora.html>, 01/05/2021.
- [7] Máquina de 5 ejes. <https://www.metalmecanica.com/temas/Maquina-de-5-ejes-para-el-mercado-latinoamericano+125102>, 01/05/2021.
- [8] Prácticas y procesos de taller de mecanizado. <https://issuu.com/marcombo/docs/practicass/50>, 01/05/2021.
- [9] Partes de una fresa. <https://obradoiroeshapeoko.wordpress.com/2013/11/10/tipos-de-fresas/>, 01/05/2021.
- [10] Euskal Herriko Unibertsitatea. Tema 11 : Taladrado. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao*, pages 1–27, 2010.
- [11] El fresado. http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/images/7/72/5_Manual_Mecanizado_Sandvik_Fresado_D.pdf, 01/05/2021.
- [12] R. Iyer, P. Koshy, and E. Ng. Helical milling: An enabling technology for hard machining precision holes in aisi d2 tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2):205–210, 2007.
- [13] Tecnología de corte helicoidal, punto crítico en el sector aeroespacial. <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/46068-Tecnologia-de-corte-helicoidal-punto-critico-en-el-sector-aeroespacial.html>, 01/05/2021.
- [14] B Denkena, D Nesper, M Rehe, and JH Dege. Process force prediction in orbital drilling of tial6v4. In *9th international conference on advanced manufacturing systems and technology*, pages 16–17, 2011.
- [15] Boehnke Denkena, D Boehnke, and JH Dege. Helical milling of cfrp–titanium layer compounds. *CIRP Journal of manufacturing Science and Technology*, 1(2):64–69, 2008.
- [16] Fundamentos de los procesos de mecanizado. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn38.html>, 01/05/2021.
- [17] Jie Liu, Guang Chen, Chunhui Ji, Xuda Qin, Hao Li, and Chengzu Ren. An investigation of workpiece temperature variation of helical milling for carbon fiber reinforced plastics (cfrp). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 86:89–103, 2014.
- [18] PA Rey, John LeDref, Johanna Senatore, and Yann Landon. Modelling of cutting forces in orbital drilling of titanium alloy ti-6al-4v. *International journal of machine tools and manufacture*, 106:75–88, 2016.
- [19] A Sadek, M Meshreki, and MH Attia. Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates. *CIRP annals*, 61(1):123–126, 2012.

- [20] Haiyan Wang, Xuda Qin, Chengzu Ren, and Qi Wang. Prediction of cutting forces in helical milling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(9-12):849–859, 2012.
- [21] Rugosidad superficial. <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>, 01/05/2021.
- [22] Carmen Viera Viera. Comportamiento a fatiga de piezas de titanio (ti-6al-4v) fabricadas mediante selective laser melting. *Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla*, 1:1–106, 2019.
- [23] Kendu. <https://www.kendu.com/es/>, 01/05/2021.
- [24] Minitab. <https://www.minitab.com/es-mx/>, 01/05/2021.
- [25] Guolin Yang, Zhigang Dong, Shang Gao, Yan Bao, Renke Kang, and Dongming Guo. A novel reverse helical milling process for reducing push-out delamination of cfrp. *Composite Structures*, 253:112778, 2020.
- [26] Haiyan Wang, Xuda Qin, Hao Li, and Yanqing Tan. A comparative study on helical milling of cfrp/ti stacks and its individual layers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(5):1973–1983, Sep 2016.
- [27] Haiyan WANG, Xuda QIN, and Hao LI. Machinability analysis on helical milling of carbon fiber reinforced polymer. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 9(5):JAMDSM0057–JAMDSM0057, 2015.
- [28] Devi Kalla, Jamal Sheikh-Ahmad, and Janet Twomey. Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(10):882–891, 2010.
- [29] Csongor Pereszalai and Norbert Geier. Comparative analysis of wobble milling, helical milling and conventional drilling of cfrps. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9):3913–3930, Feb 2020.
- [30] Robert Voss, Marcel Henerichs, and Friedrich Kuster. Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fibre reinforced plastics (cfrp). *CIRP Annals*, 65(1):137–140, 2016.
- [31] Shigehiko Sakamoto and Hiroki Iwasa. Effect of cutting revolution speed on cutting temperature in helical milling of cfrp composite laminates. In *Emerging Technology in Precision Engineering XIV*, volume 523 of *Key Engineering Materials*, pages 58–63. Trans Tech Publications Ltd, 11 2012.
- [32] Qing Liang Chen, Xue Mei Chen, Zuo Heng Duan, and Wen Yuan Cun. Research on helical milling specialized tool based on chip-splitting mechanism. In *Research in Materials and Manufacturing Technologies IV*, volume 1061 of *Advanced Materials Research*, pages 497–506. Trans Tech Publications Ltd, 1 2015.
- [33] Xuda Qin, Bin Wang, Guofeng Wang, Hao Li, Yuedong Jiang, and Xinpei Zhang. Delamination analysis of the helical milling of carbon fiber-reinforced plastics by using the artificial neural network model. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(2):713–719, Feb 2014.
- [34] Ben Wang, Yufeng Wang, Hua Zhao, Lei Sun, Minghai Wang, and Xianjun Kong. Effect of a ti alloy layer on cfrp hole quality during helical milling of cfrp/ti laminate. *Composite Structures*, 252:112670, 2020.
- [35] Anwesa Barman, Raviraja Adhikari, and Gururaj Bolar. Evaluation of conventional drilling and helical milling for processing of holes in titanium alloy ti6al4v. *Materials Today: Proceedings*, 28:2295–2300, 2020. 2nd International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Nanotechnology.

- [36] Zhaolong Zhu, Dietrich Buck, Xiaolei Guo, Pingxiang Cao, and Jinxin Wang. Cutting performance in the helical milling of stone-plastic composite with diamond tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31:119–129, 2020.
- [37] Jiaying GE, Guang CHEN, Yongxiang SU, Yunhe ZOU, Chengzu REN, Xuda QIN, and Guofeng WANG. Effect of cooling strategies on performance and mechanism of helical milling of cfrp/ti-6al-4[U+202F]v stacks. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020.
- [38] Saeid Amini, Mohammad Baraheni, and Emad Hakimi. Enhancing dimensional accuracy and surface integrity by helical milling of carbon fiber reinforced polymers. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(4):362–372, 2019. Research progress on subtractive and additive manufacturing.
- [39] Csongor Pereszlai, Norbert Geier, Dániel István Poór, Barnabás Zoltán Balázs, and György Póka. Drilling fibre reinforced polymer composites (cfrp and gfrp): An analysis of the cutting force of the tilted helical milling process. *Composite Structures*, 262:113646, 2021.
- [40] Aleaciones. <https://centralwire.com/es/alloys/>, 01/05/2021.
- [41] Tedae agenda sectorial de la industria aeronáutica. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjymdDK3fXuAhUR08AKHcIaDzwQFjAAegQIARAD&url=https%3A%2F%2Fwww.tedae.org%2Fuploads%2Ffiles%2Fagenda-aeronautica.pdf&usg=AOvVaw2tuKCs_gDhKa5JIA3u6k0e, 19/02/2021.
- [42] What is the airframe itd and what are the challenges? <https://www.cleansky.eu/airframe>, 24/02/2021.
- [43] Collaborative owa robots for drilling and fasteners insertion in assembly lines. <https://cordis.europa.eu/project/id/738200>, 02/04/2021.
- [44] Optimización del proceso de taladrado dentro del contexto de la industria 4.0. <https://www.interempresas.net/Portada/Articles/207043-Optimizacion-del-proceso-de-taladrado-dentro-del-contexto-de-la-Industria-40.html>, 18/03/2021.
- [45] ¿qué es la industria? <https://concepto.de/industria/>, 02/04/2021.
- [46] Significado de industria. <https://www.significados.com/industria/>, 02/04/2021.
- [47] Building a 747: 43 days and 3 million fasteners. <https://www.csmonitor.com/1997/1029/102997.us.us.2.html>, 18/03/2021.
- [48] Sergio Martín Bejar. *Análisis Paramétrico del comportamiento a fatiga de piezas torneadas en seco de la aleación UNS A97075 (Al-Zn)*. PhD thesis, Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación. Universidad de Málaga, Diciembre 2019.
- [49] Sandvik Coromant and DPTO EDICIONES TÉCNICAS. El mecanizado moderno–manual práctico. *Departamento de ediciones técnicas de Sandvik Coromant, Suecia*, 1994.
- [50] Conocimientos de mecanizado. <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/pages/default.aspx>, 16/04/2021.
- [51] Mecanizado por arranque de viruta. http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/725_ca.pdf, 16/04/2021.
- [52] Taladrar un agujero. <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/drilling/pages/default.aspx>, 16/04/2021.
- [53] S. Kalpakjian and S.R. Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación, 2002.
- [54] La historia del taladrado y su evolución histórica. <https://cajonherramientas.com/blog/historia-taladro-evolucion-historica/>, 30/04/2021.

- [55] Desarrollos en la automatización del taladrado de estructuras aeronáuticas. <https://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/143203-Desarrollos-en-la-automatizacion-del-taladrado-de-estructuras-aeronauticas.html>, 30/04/2021.
- [56] ¿qué es un taladro, cuántos tipos hay y para qué sirven? <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-electricas-y-accesorios/taladros-tipos>, 30/04/2021.
- [57] Maquinas de taladrar. <https://sites.google.com/site/mecanizadotema6jose/6-2-maquinas-de-taladrar>, 30/04/2021.
- [58] ¿qué es una broca?, los tipos y sus usos. <https://www.ingmecafenix.com/herramientas/broca/>, 30/04/2021.
- [59] Tipos de brocas, para metal, hormigón, madera, vidrio, sds, hss, plástico, etc... <http://www.taladros.info/Brocas.html>, 30/04/2021.
- [60] Fórmulas y definiciones de taladrado. <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/drilling.aspx>, 30/04/2021.
- [61] Parámetros de corte en el taladrado. https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/TFM/TFM06/es_DFM_TFM06_Contenidos/website_11_parmetros_de_corte_en_el_taladrado.html, 30/04/2021.
- [62] Fresado. <https://www.imh.eus/es/imh/comunicacion/docu-libre/procesos-fabricacion/mecanizado/arranque-de-viruta/fresado>, 01/05/2021.
- [63] Breve historia de la máquina-herramienta de elgoibar (iii). <http://www.elgoibar.org/aldizkaria/201406aleag.pdf>, 01/05/2021.
- [64] ¿qué es un fresado exitoso? <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/pages/default.aspx>, 01/05/2021.
- [65] Fresado y taladrado de materiales duros. <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/111326-Fresado-y-taladrado-de-materiales-duros.html>, 01/05/2021.
- [66] Herramientas de corte para la fresadora. <https://arukasi.wordpress.com/2011/09/08/herramientas-de-corte-para-la-fresadora/>, 01/05/2021.
- [67] ¿qué son y cómo se usan las fresas? <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/fresas-tipos-y-usos>, 01/05/2021.
- [68] Tipos y usos de fresas. <https://www.demaquinasyherramientas.com/wp-content/uploads/2012/06/TABLA2.jpg>, 01/05/2021.
- [69] Materiales de las herramientas de corte. <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>, 01/05/2021.
- [70] Taladrar. <http://www.bricotodo.com/taladrar.htm>, 01/05/2021.
- [71] Lutz Deitert. Orbital drilling. Technical report, SAE Technical Paper, 2011.
- [72] Robson Bruno Dutra Pereira, Lincoln Cardoso Brandão, Anderson Paulo de Paiva, João Roberto Ferreira, and J. Paulo Davim. A review of helical milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 120:27–48, 2017.
- [73] Orbital drilling enables “one-up assembly”. <https://www.compositesworld.com/articles/orbital-drilling-enables-one-up-assembly>, 01/05/2021.
- [74] Using helical interpolation to make large-diameter holes. <https://www.mmsonline.com/articles/using-helical-interpolation-to-make-large-diameter-holes>, 01/05/2021.

- [75] Partes, Ángulos y superficies de las herramientas. http://concurso.cnice.mec.es/cnice2005/2_mecanizado_fresadora/curso/33/A_2/index.htm, 01/05/2021.
- [76] Materiales de las piezas. <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>, 01/05/2021.
- [77] La lubricación en procesos de mecanizado. <https://www.interempresas.net/Mantenimiento/Articulos/112256-La-lubricacion-en-procesos-de-mecanizado.html>, 01/05/2021.
- [78] Fresado a alta velocidad en seco y con mínima cantidad de lubricante. <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/12203-Fresado-a-alta-velocidad-en-seco-y-con-minima-cantidad-de-lubricante.html>, 01/05/2021.
- [79] Changyi Liu, Gui Wang, and Matthew S Dargusch. Modelling, simulation and experimental investigation of cutting forces during helical milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(9-12):839–850, 2012.
- [80] Yicai Shan, Ning He, Liang Li, Wei Zhao, and Xiaojie Qin. Orbital milling hole of aerospace al-alloy with big pitch. *Transactions of Tianjin University*, 17(5):329–335, 2011.
- [81] B Denkena, L De Leon, and JH Dege. Kinematik und spanungsformen beim zirkularfräsen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39(9):610–615, 2008.
- [82] Dalberto Dias Da Costa, Alessandro Marques, and Fred Lacerda Amorim. Hole quality and cutting time evaluation in the interpolated helical milling. *International Journal of Manufacturing Research*, 10(4):313–327, 2015.
- [83] Zhongqun Li, Qiang Liu, Xingzu Ming, Xin Wang, and Yafeng Dong. Cutting force prediction and analytical solution of regenerative chatter stability for helical milling operation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1-4):433–442, 2014.
- [84] Virutas metálicas y residuos del mecanizado : cómo reducirlos. https://teoriadeconstruccion.net/blog/viruta_metalica/, 01/05/2021.
- [85] Manuel Estrems Amestoy. Principios de mecanizado y planificación de procesos. <http://www.dimf.upct.es/personal/EAM/Principios1> : 1 – 114, 2007.
- [86] Wang Haiyan and Qin Xuda. A mechanistic model for cutting force in helical milling of carbon fiber-reinforced polymers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(9):1485–1494, 2016.
- [87] Zhongqun Li, Qiang Liu, Chong Peng, and Xiao Sun. Cutting force modeling and simulation for hole-making process by helical milling. In *Fourth International Seminar on Modern Cutting and Measurement Engineering*, volume 7997, page 799703. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [88] Origin. <https://www.originlab.com/origin>, 01/05/2021.
- [89] Sciencedirect. <https://www.sciencedirect.com/>, 01/05/2021.
- [90] Kistler. <https://www.kistler.com/es/soluciones/pruebas-de-desarrollo-e-investigacion/dinamometros-para-medir-la-fuerza-de-corte/>, 01/05/2021.
- [91] Carlos Cesar Aparecido Eguti and Luis Gonzaga Trabasso. Design of a robotic orbital driller for assembling aircraft structures. *Mechatronics*, 24(5):533–545, 2014.
- [92] E Brinksmeier and S Fangmann. Burr and cap formation by orbital drilling of aluminum. In *Burrs-Analysis, Control and Removal*, pages 31–45. Springer, 2010.
- [93] Fibra de carbono: qué es y por qué es tan atractiva para la electrónica de consumo como para la aeronáutica o la automoción. <https://www.xataka.com/investigacion/fibra-carbono-que-que-atractiva-para-electronica-consumo-como-para-aeronautica-automocion>, 01/05/2021.

- [94] P.F. Mayuet Ares. Propuesta metodológica y primeros resultados para el estudio de la calidad del taladrado de materiales compuestos de fibra de carbono con matriz epoxídica. *Universidad de Cádiz*, 2011.
- [95] Carolina Llano Uribe. Fibra de carbono. *Metalactual*, 2011.
- [96] Materiales compuestos, fibra de vidrio y fibra de carbono. <http://materialesdeingenieria2013.blogspot.com/2013/05/>, 01/05/2021.
- [97] La fibra de carbono, un material para el siglo 21. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/16574-La-fibra-de-carbono-un-material-para-el-siglo-21.html>, 01/05/2021.
- [98] Los composites de fibra de carbono. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/121662-Los-composites-de-fibra-de-carbono.html>, 01/05/2021.
- [99] G.J. Gutierrez Frigolet. Estado del arte en taladrado de materiales compuestos por fibra de carbono y matriz de resina epoxi. *Universidad de Cádiz*, 2011.
- [100] M.Álvarez. Estudio preliminar del taladrado de materiales compuestos de uso aeronáutico. *Universidad de Cádiz*, 2008.
- [101] Fermín Bañón García. Estudio del taladrado de apilados aeronáuticos cfrp/uns a92024 con unión adhesiva. *Universidad de Cádiz*, 2016.
- [102] Cerón Rodríguez. Estudio de la problemática del taladrado de materiales compuestos en la industria aeronáutica. *Universidad de Cádiz*, 2010.
- [103] Estudio de los materiales compuestos. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>, 01/05/2021.
- [104] Darya Snihirova, Sviatlana V Lamaka, and M. Montemor. *Smart composite coatings for corrosion protection of aluminium alloys in aerospace applications*, pages 85–121. 11 2015.
- [105] Santiago Poveda Martínez. Representación normalizada de piezas de material compuesto. *VGG*, 2011.
- [106] Titanio - ti. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ti.htm>, 01/05/2021.
- [107] Titanio. <https://www.quimica.es/enciclopedia/Titanio.html>, 01/05/2021.
- [108] Revista tope nº 191 - noviembre 2013. https://issuu.com/revistatope/docs/revista_tope_n___191_noviembre_2013/29, 01/05/2021.
- [109] Titanio. <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/industrysolutions/aerospace/titanium/pages/default.aspx>, 01/05/2021.
- [110] Titanium grade 5. <https://www.americanspecialmetals.com/es-titaniumgrade5es.html>, 01/05/2021.
- [111] Diseño factorial minitab. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/factorial-and-fractional-factorial-designs/>, 01/05/2021.
- [112] itnc 530. <https://icar.com.mx/wp-content/uploads/2015/01/tnc530-design7-es.pdf>, 01/05/2021.
- [113] Catia. <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/>, 01/05/2021.
- [114] Envolvente en origin. <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Envelope-Algorithm>, 25/01/2021.
- [115] Diagrama de pareto de efectos estandarizados. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/pareto-chart/>, 07/05/2021.

ANEXOS

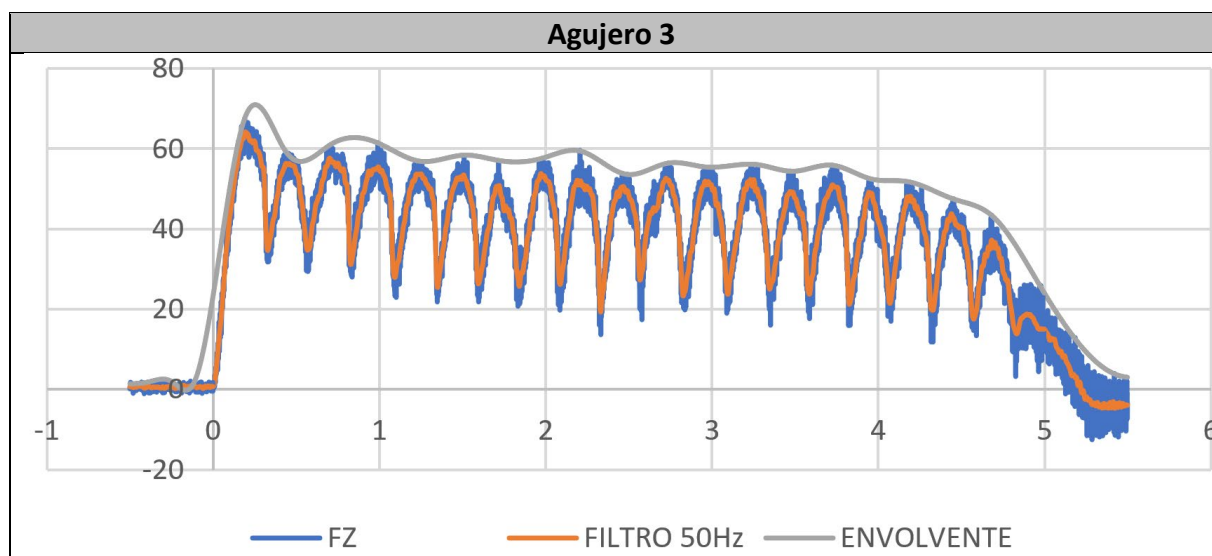
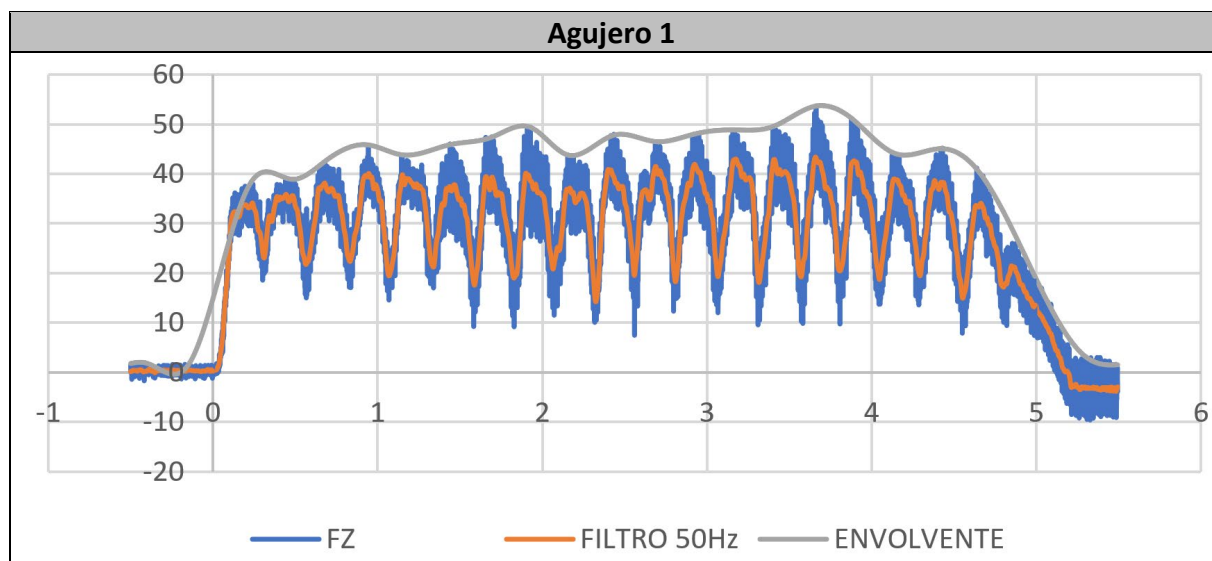
Índice

A. Resultado de fuerzas en los ensayos de CFRP	113
A.1. 1_HM_CFRP_75_30_3_C	113
A.2. 2_HM_CFRP_150_30_6_O	116
A.3. 3_HM_CFRP_75_60_3_O	119
A.4. 4_HM_CFRP_150_60_3_C	122
A.5. 5_HM_CFRP_75_30_6_O	125
A.6. 6_HM_CFRP_150_30_6_C	127
A.7. 7_HM_CFRP_75_60_6_C	130
A.8. 8_HM_CFRP_150_60_6_O	133
A.9. 9_HM_CFRP_112.5_45_4.5_C	136
A.10.10_HM_CFRP_112.5_45_4.5_O	139
B. Resultado de fuerzas en los ensayos de titanio	142
B.1. Fase 1	142
B.1.1. 1_HM_Ti_80_15_0.5_C	142
B.1.2. 2_HM_Ti_160_15_1_O	145
B.1.3. 3_HM_Ti_80_30_0.5_O	148
B.1.4. 4_HM_Ti_160_30_0.5_C	151
B.1.5. 5_HM_Ti_80_15_1_O	153
B.1.6. 6_HM_Ti_160_15_1_C	156
B.1.7. 7_HM_Ti_80_30_1_C	158
B.1.8. 8_HM_Ti_160_30_1_O	161
B.1.9. 9_HM_Ti_120_22.5_0.75_C	164
B.1.10.10_HM_Ti_120_22.5_0.75_O	167
B.2. Fase 2	170
B.2.1. Repetición 6_HM_Ti_160_15_1_C	170
B.2.2. 2_HM_Ti_160_15_1_C	172
B.2.3. 3_HM_Ti_80_30_0.5_C	175
B.2.4. 5_HM_Ti_80_15_1_C	178
B.2.5. 8_HM_Ti_160_30_1_C	181
B.3. Ensayo Vida	184
B.3.1. 5_Vida_HM_Ti_80_15_1_C	184
C. Especificaciones de la herramienta	210

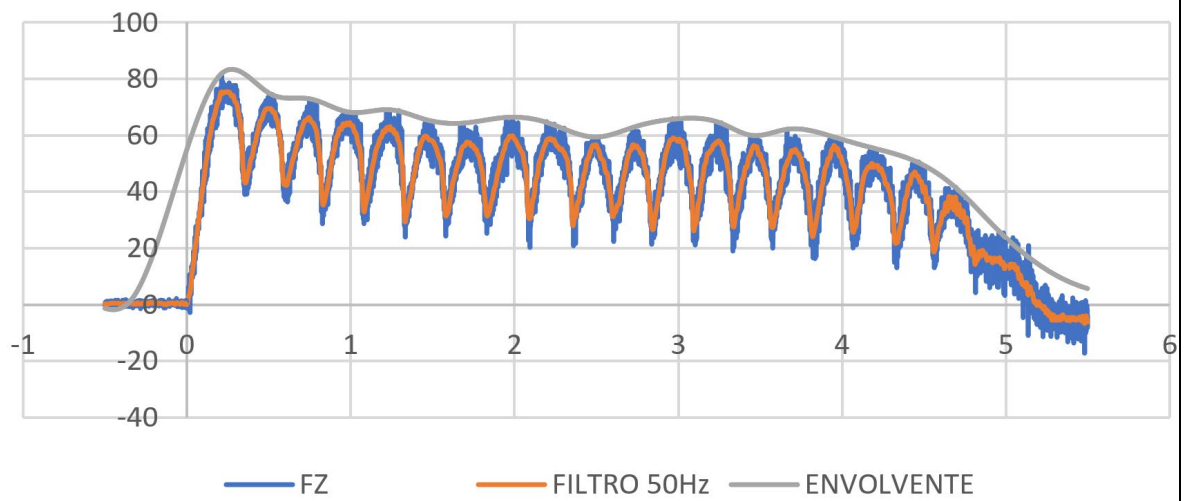
A. Resultado de fuerzas en los ensayos de CFRP

A.1. 1_HM_CFRP_75_30_3_C

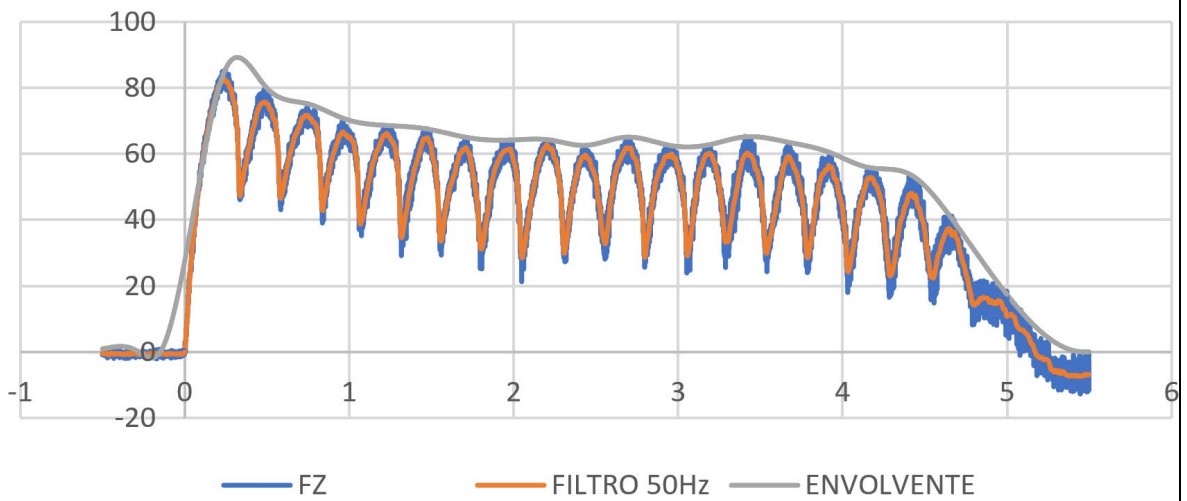
Fuerzas				
Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	31.109 N	41.298 N	46.684 N	49.585 N
Media Envolvente	44.368 N	54.650 N	62.404 N	62.434 N
Valor Máximo	53.664 N	67.529 N	81.864 N	85.580 N
Diferencia Envolvente - Media	13.259 N	13.351 N	15.719 N	12.848 N



Agujero 7

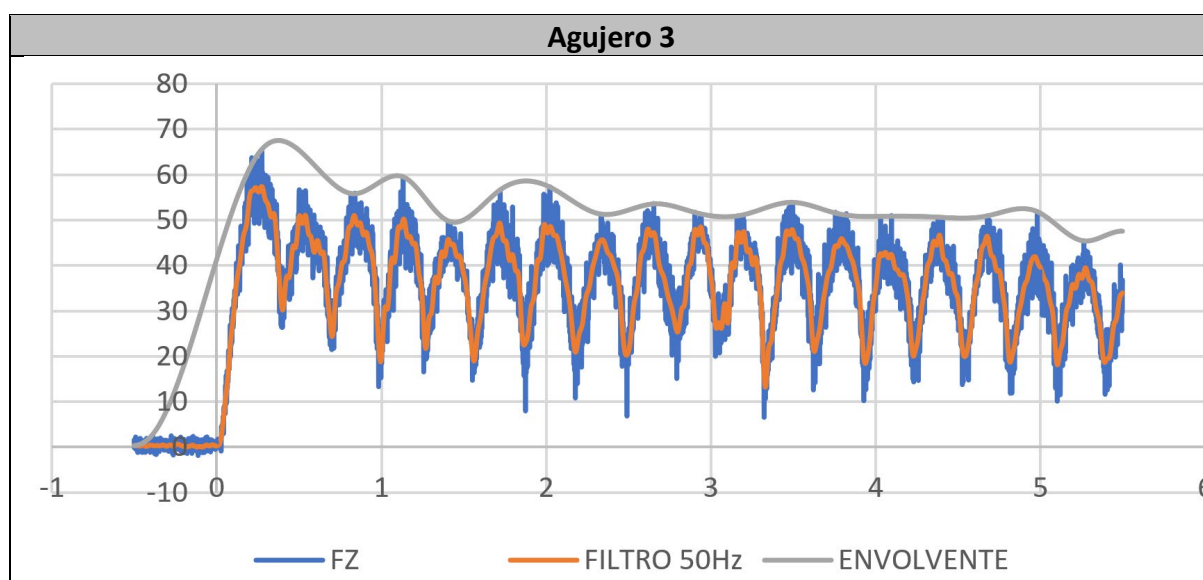
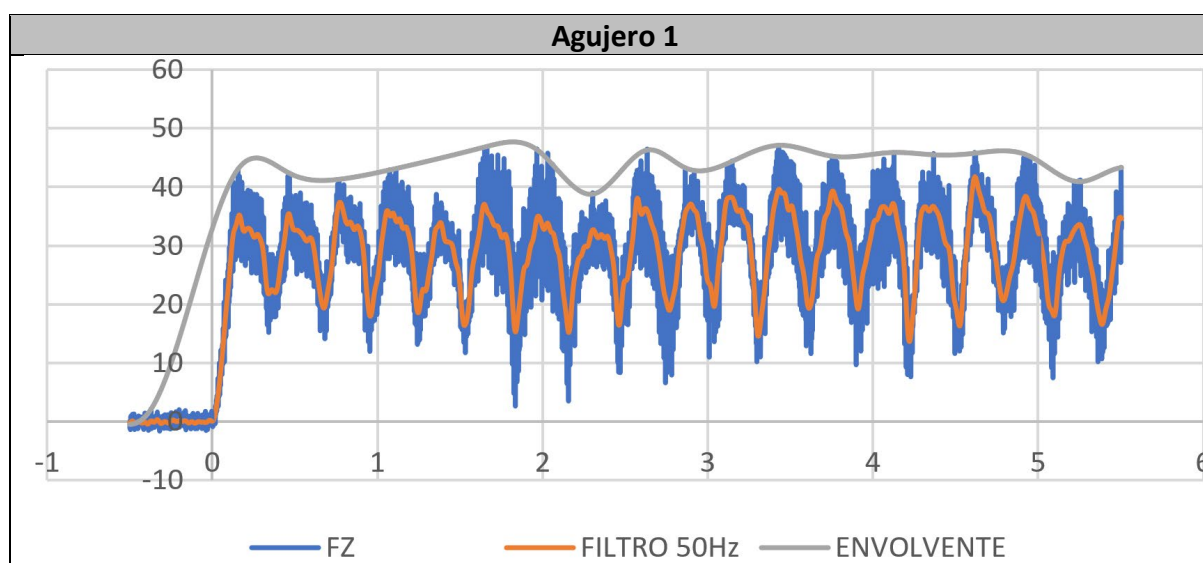


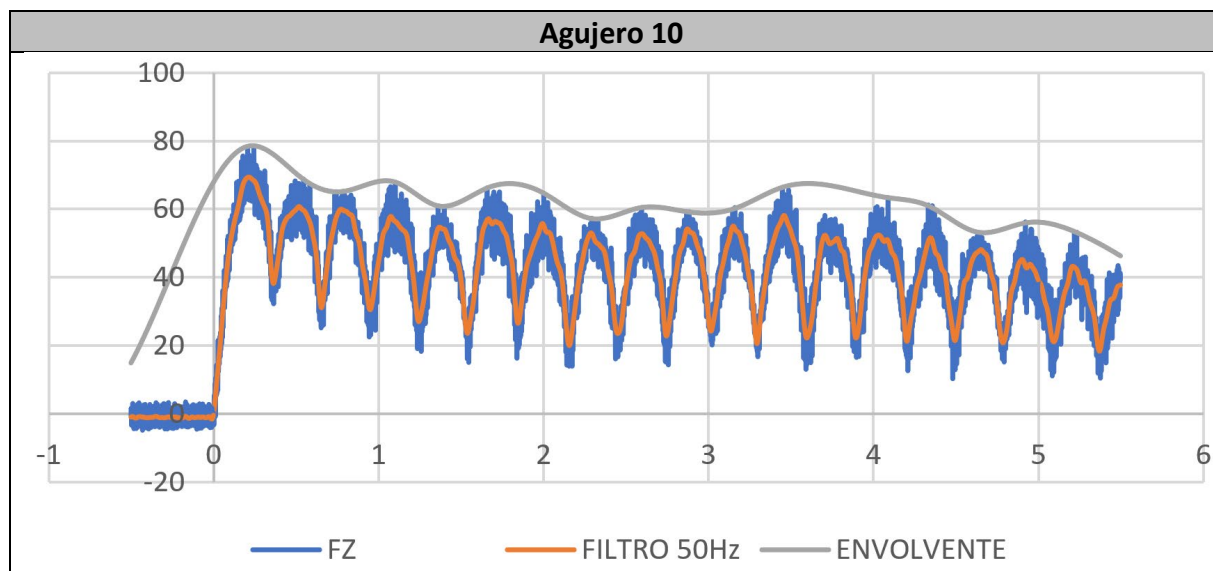
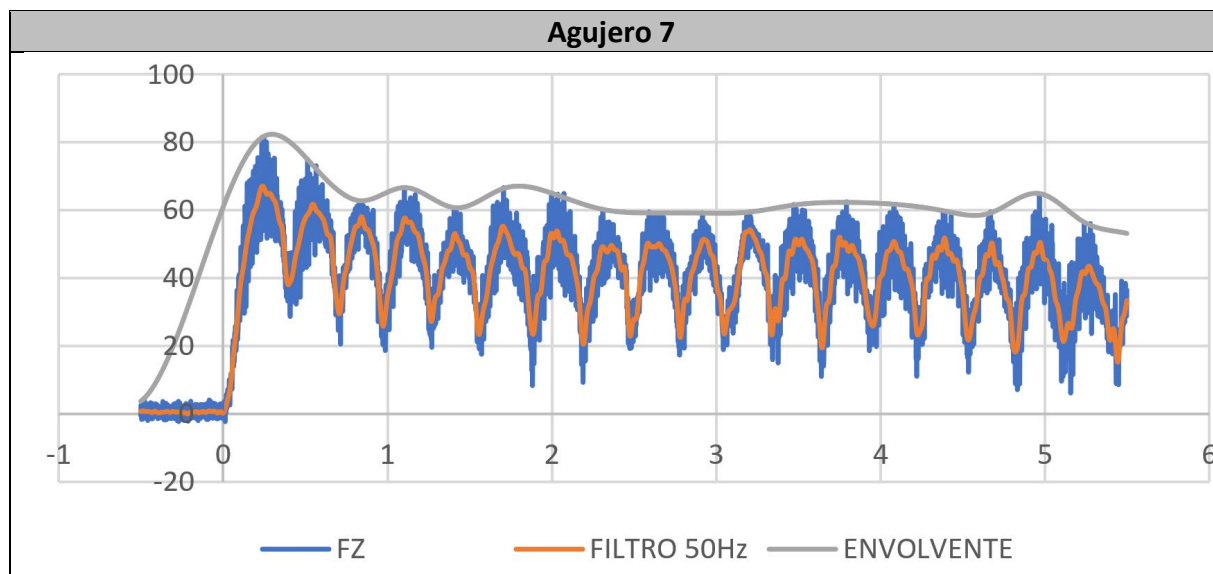
Agujero 10



A.2. 2_HM_CFRP_150_30_6_O

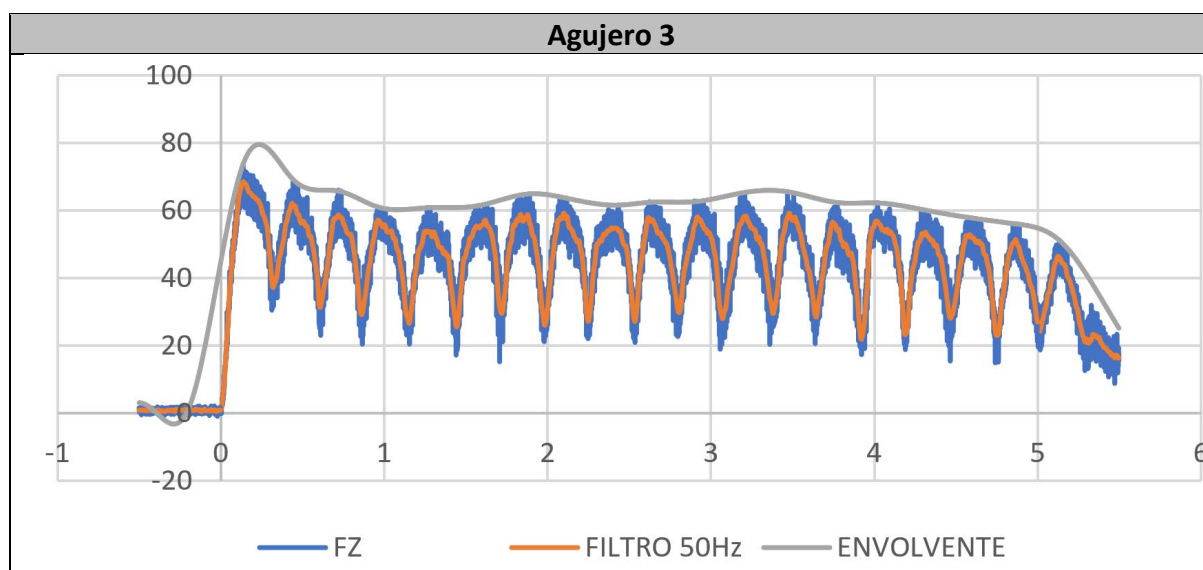
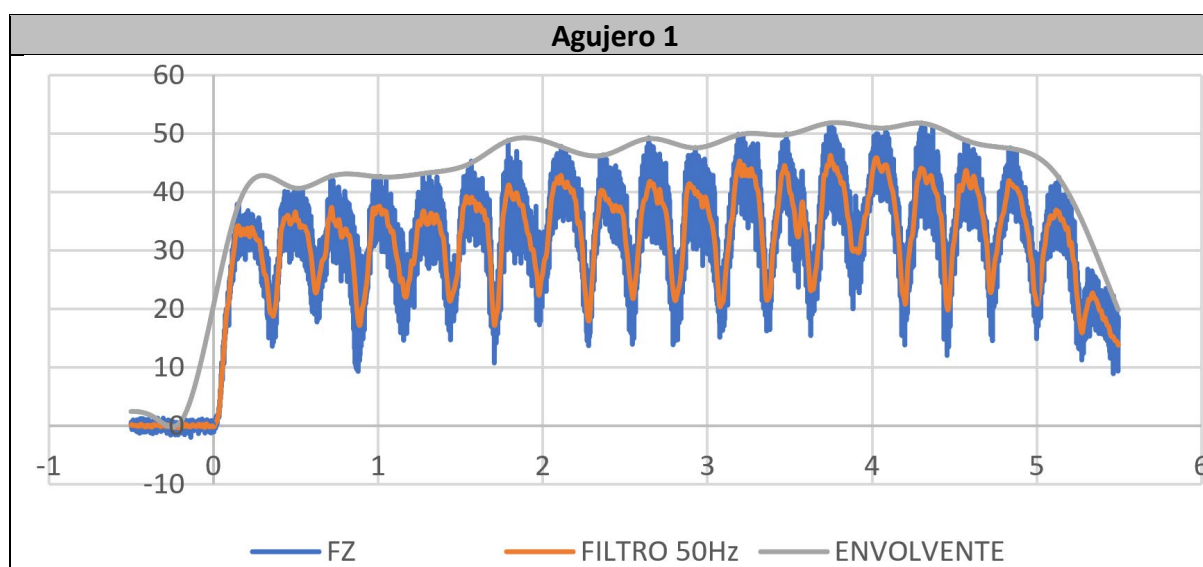
Fuerzas				
Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	29.321 N	37.452 N	42.829 N	44.352 N
Media Envolvente	44.291 N	54.225 N	63.761 N	63.595 N
Valor Máximo	47.097 N	65.591 N	81.424 N	78.390 N
Diferencia Envolvente - Media	14.970 N	16.772 N	20.932 N	19.242 N

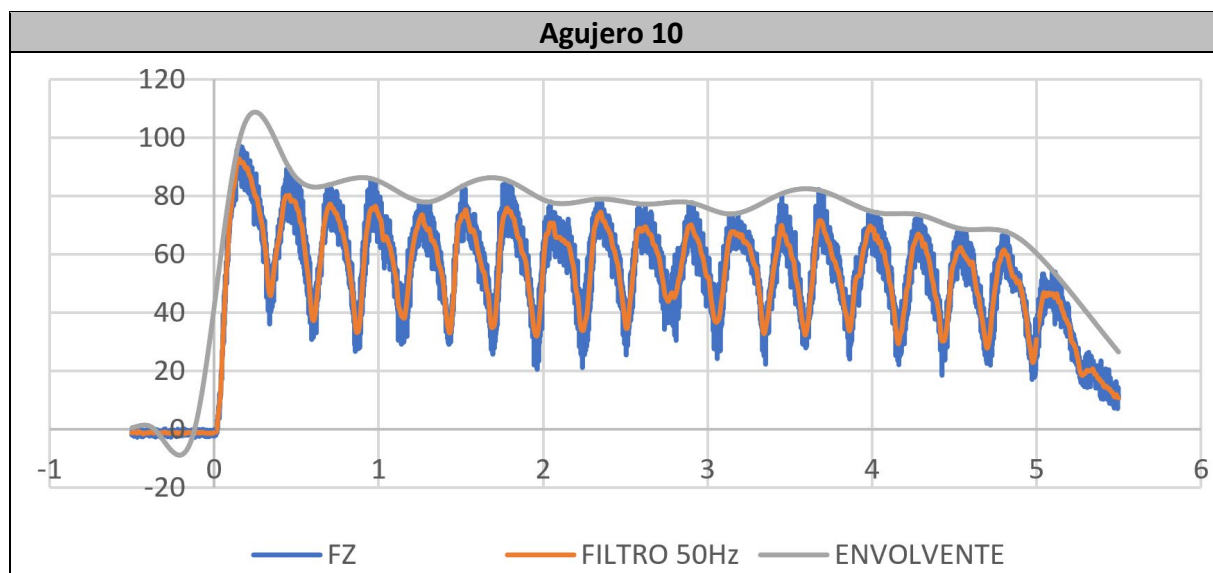
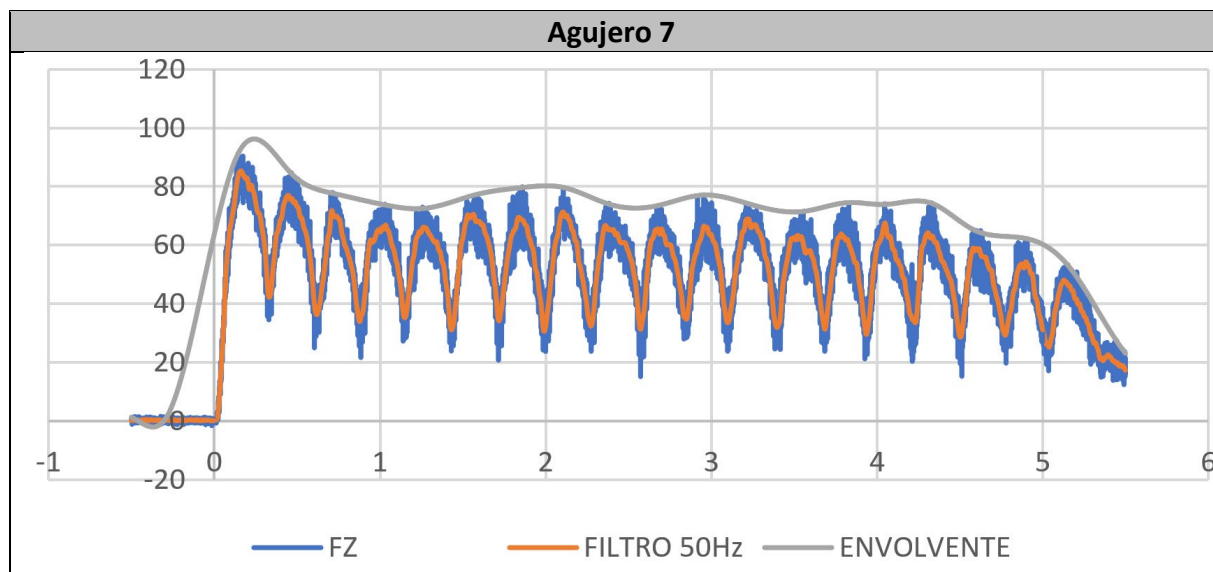




A.3. 3_HM_CFRP_75_60_3_O

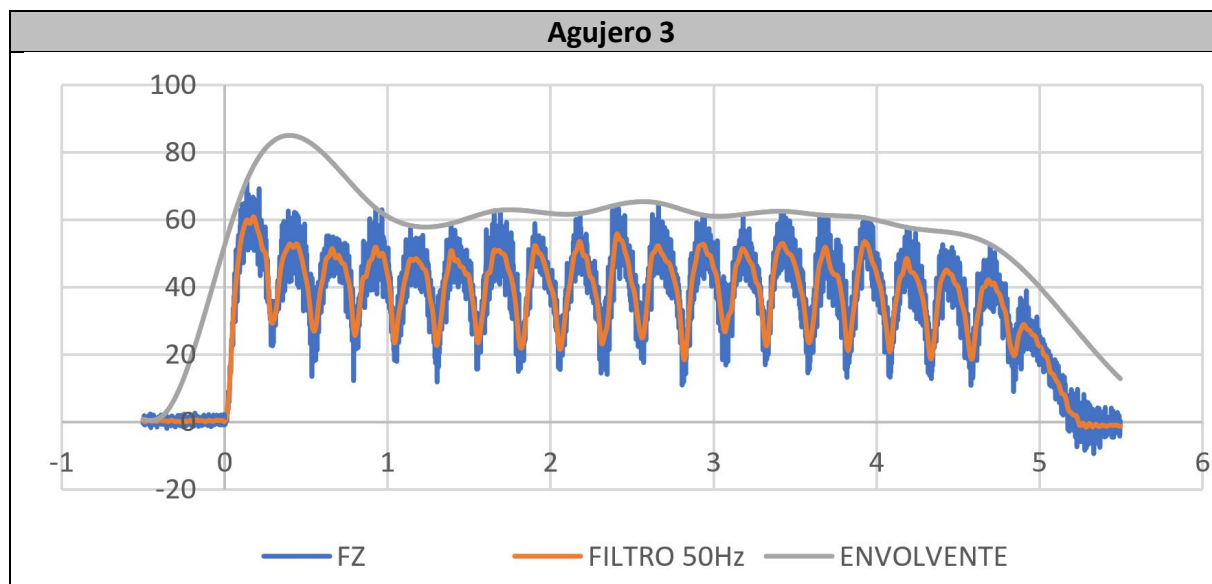
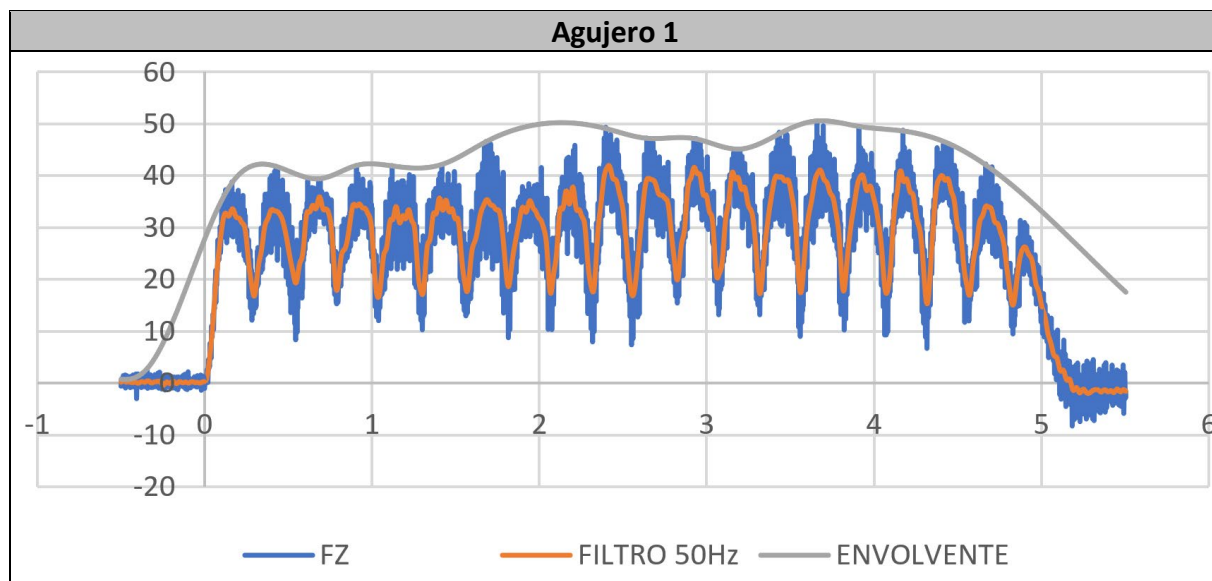
Fuerzas				
Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	33.345 N	46.906 N	54.558 N	56.792 N
Media Envolvente	46.590 N	63.018 N	75.299 N	79.362 N
Valor Máximo	51.809 N	73.679 N	91.202 N	97.514 N
Diferencia Envolvente - Media	13.245 N	16.111 N	20.741 N	22.570 N

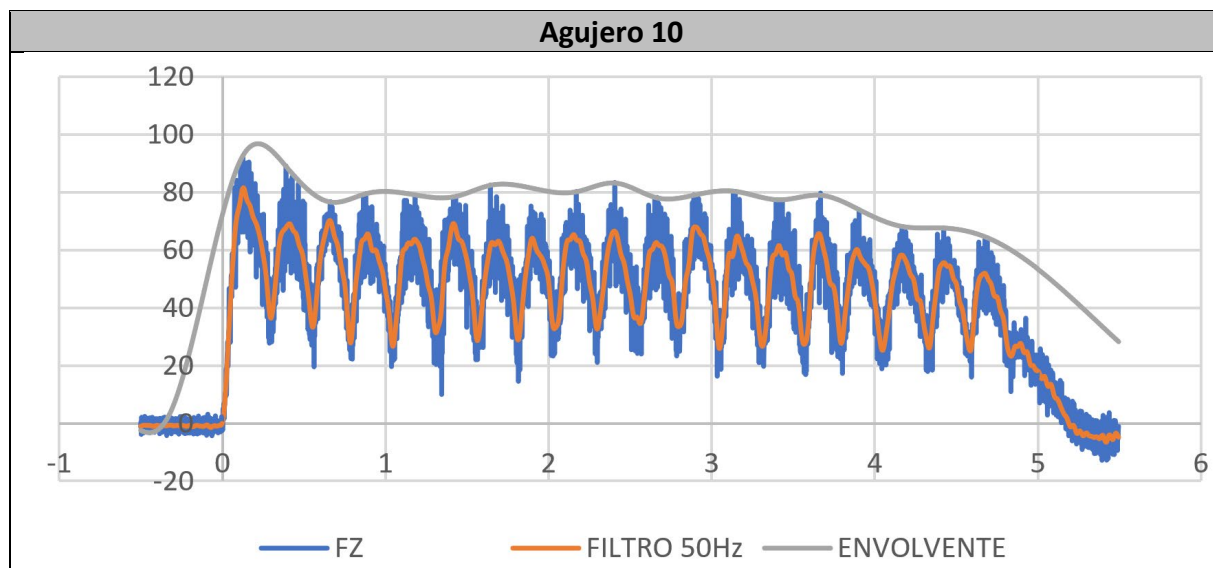
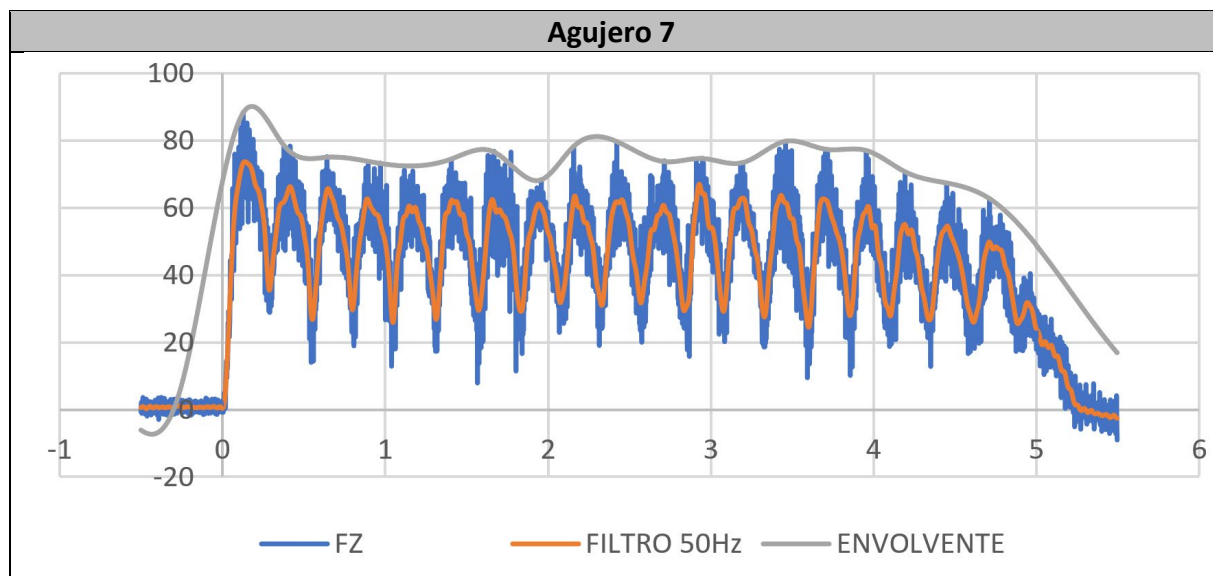




A.4. 4_HM_CFRP_150_60_3_C

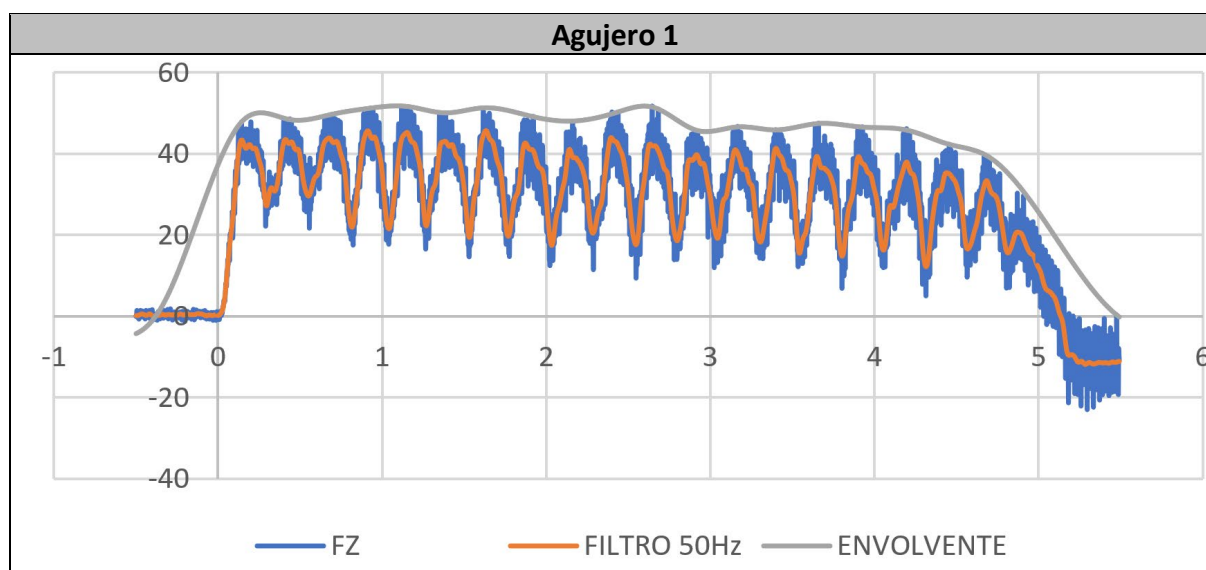
Fuerzas				
Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	29.934 N	40.176 N	48.384 N	49.772 N
Media Envolvente	44.957 N	62.691 N	73.988 N	77.510 N
Valor Máximo	50.568 N	71.644 N	88.255 N	92.597 N
Diferencia Envolvente - Media	15.023 N	22.514 N	25.604 N	27.737 N





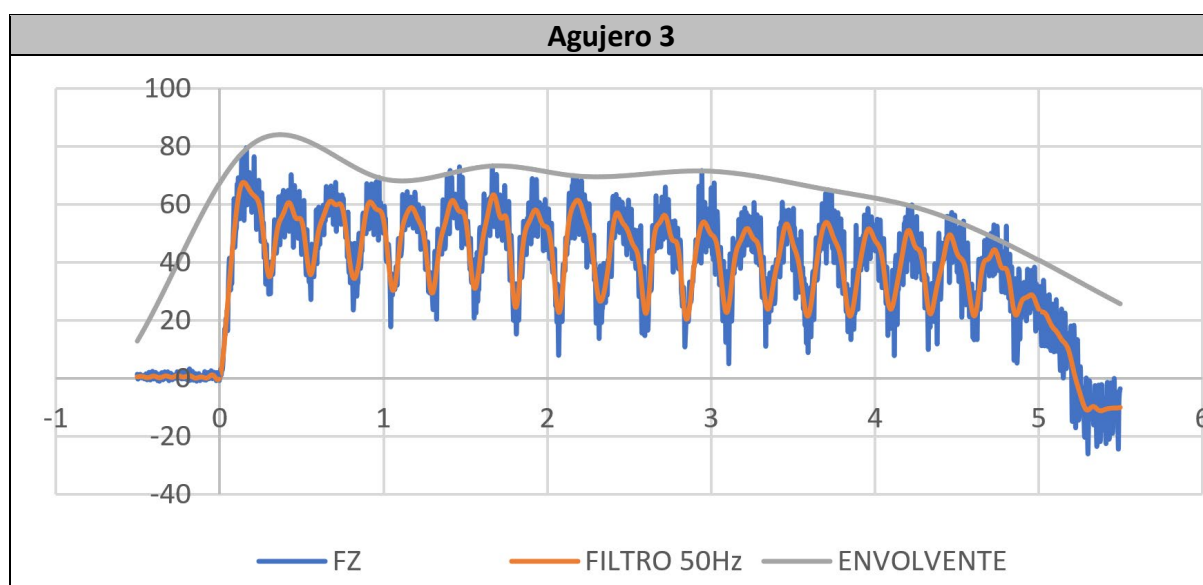
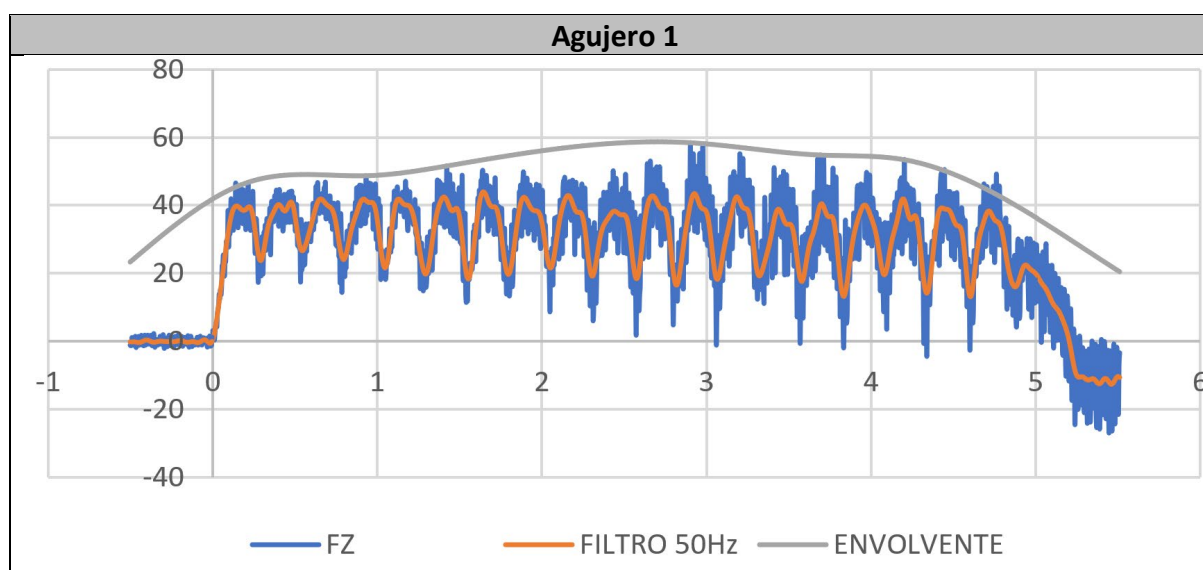
A.5. 5_HM_CFRP_75_30_6_O

Fuerzas	
Datos	Agujero 1
Media	31.799 N
Media Envolvente	47.124 N
Valor Máximo	51.634 N
Diferencia Envolvente - Media	15.325 N
NOTA	El archivo donde se encontraban el resto de los mecanizados estaba corrompido, siendo imposible acceder a los datos.

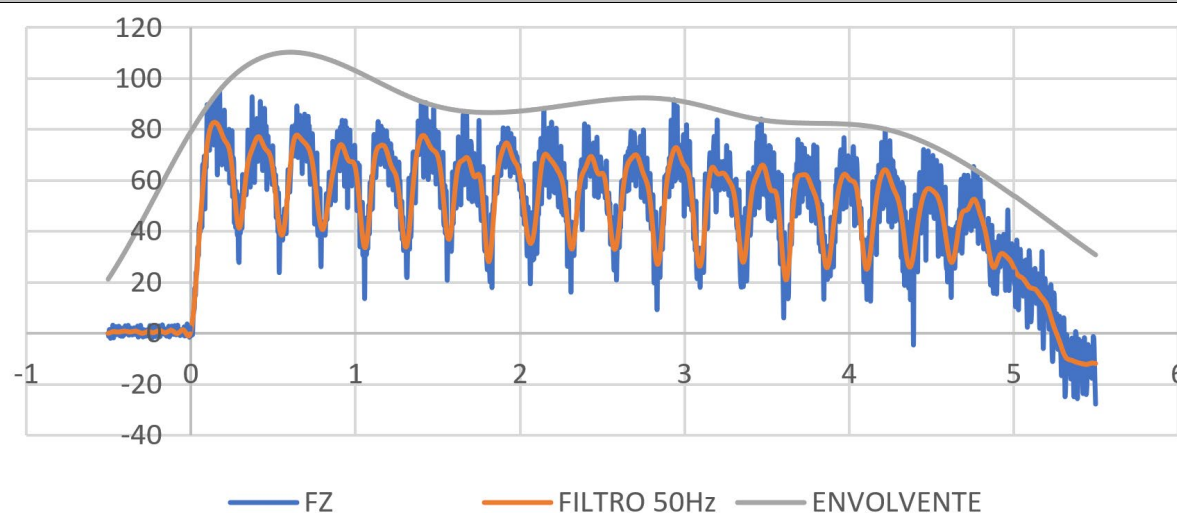


A.6. 6_HM_CFRP_150_30_6_C

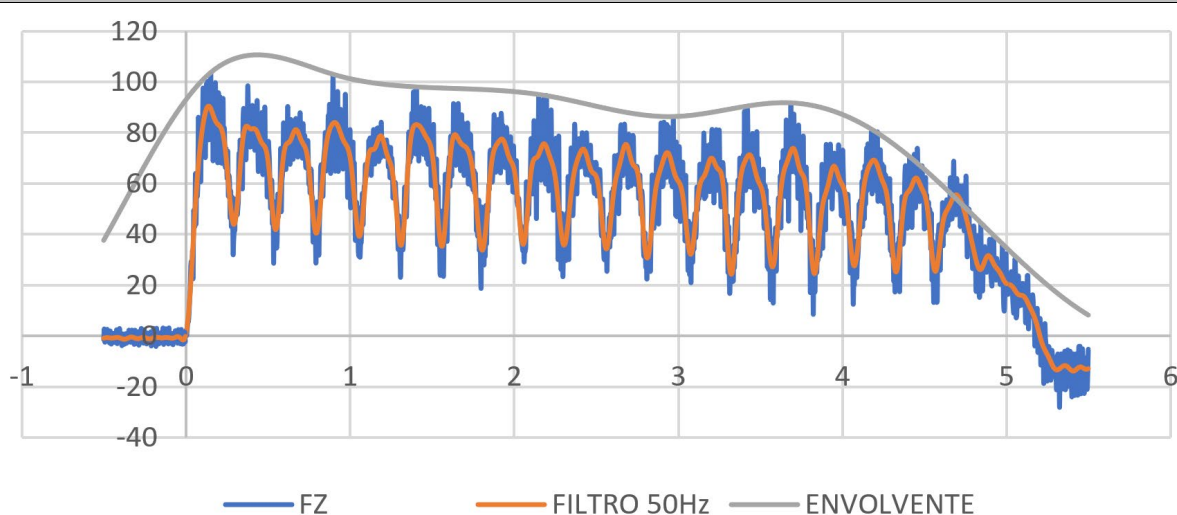
Fuerzas				
Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	32.115 N	43.930 N	54.549 N	58.200 N
Media Envolvente	52.308 N	67.924 N	88.376 N	89.591 N
Valor Máximo	58.425 N	79.214 N	95.465 N	103.627 N
Diferencia Envolvente - Media	20.192 N	23.993 N	33.827 N	31.391 N



Agujero 7

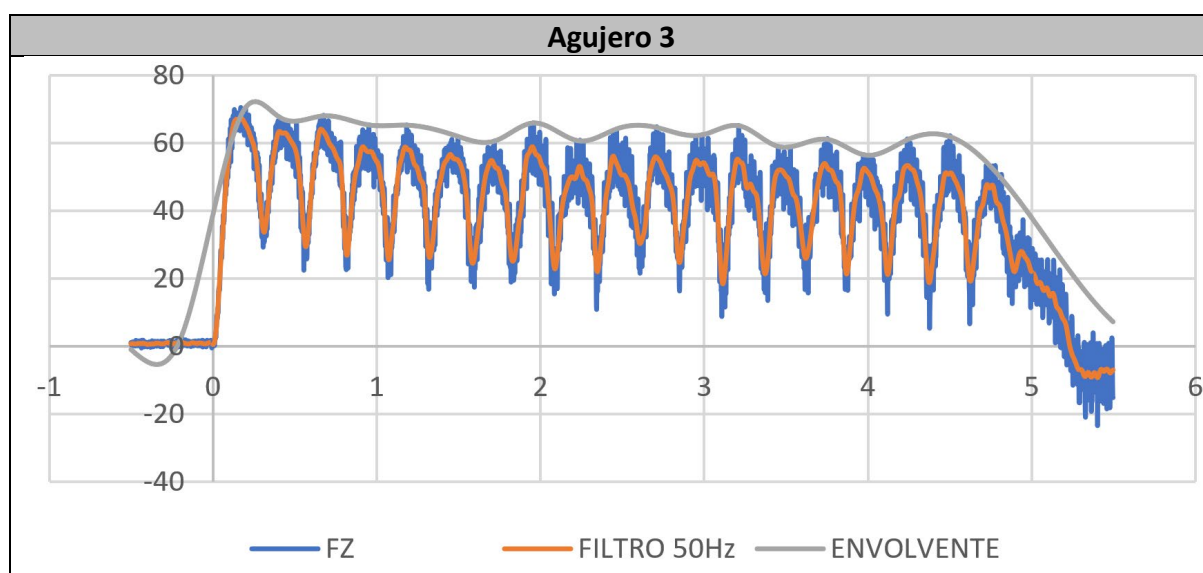
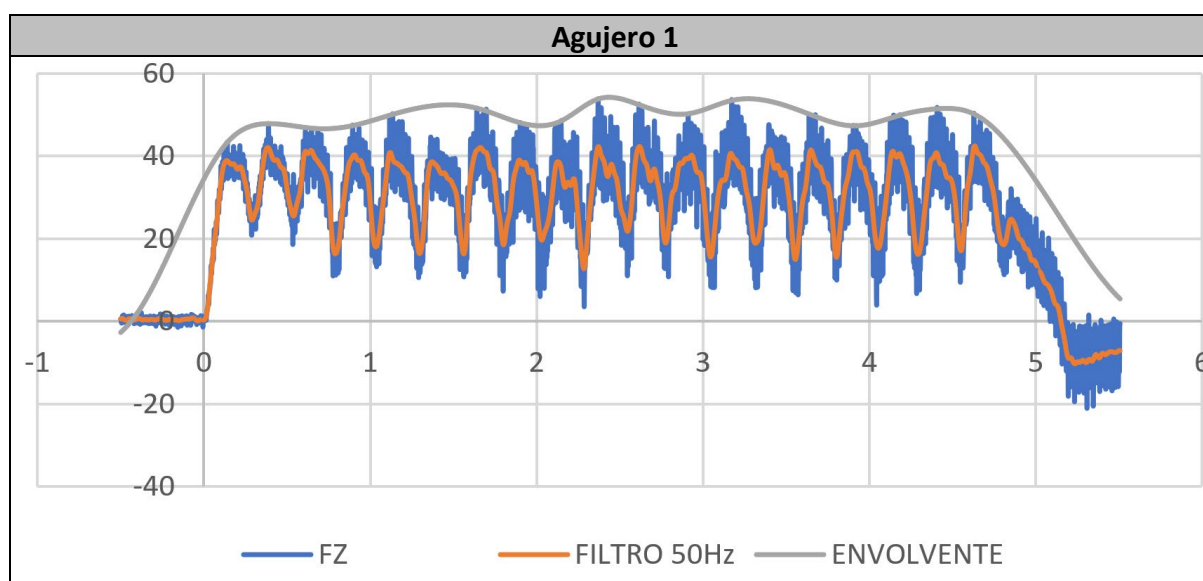


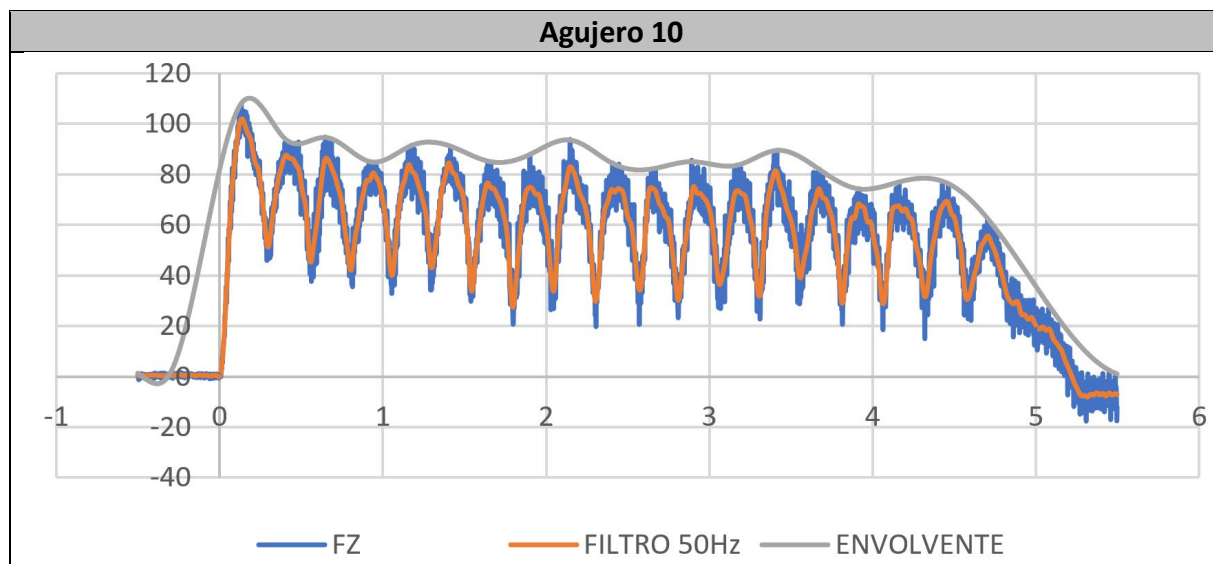
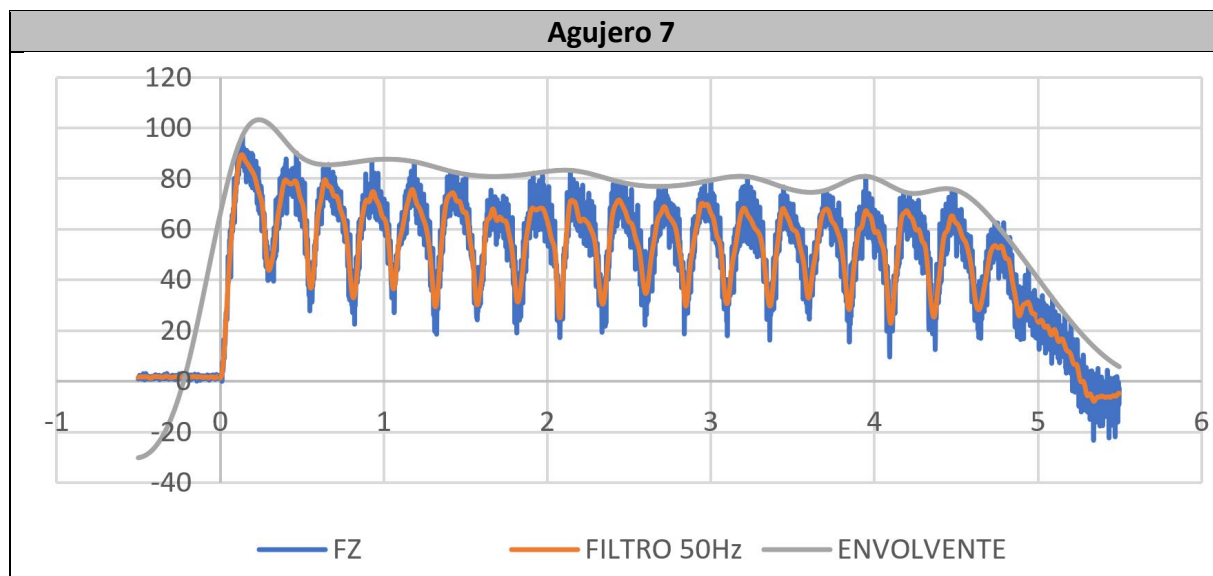
Agujero 10



A.7. 7_HM_CFRP_75_60_6_C

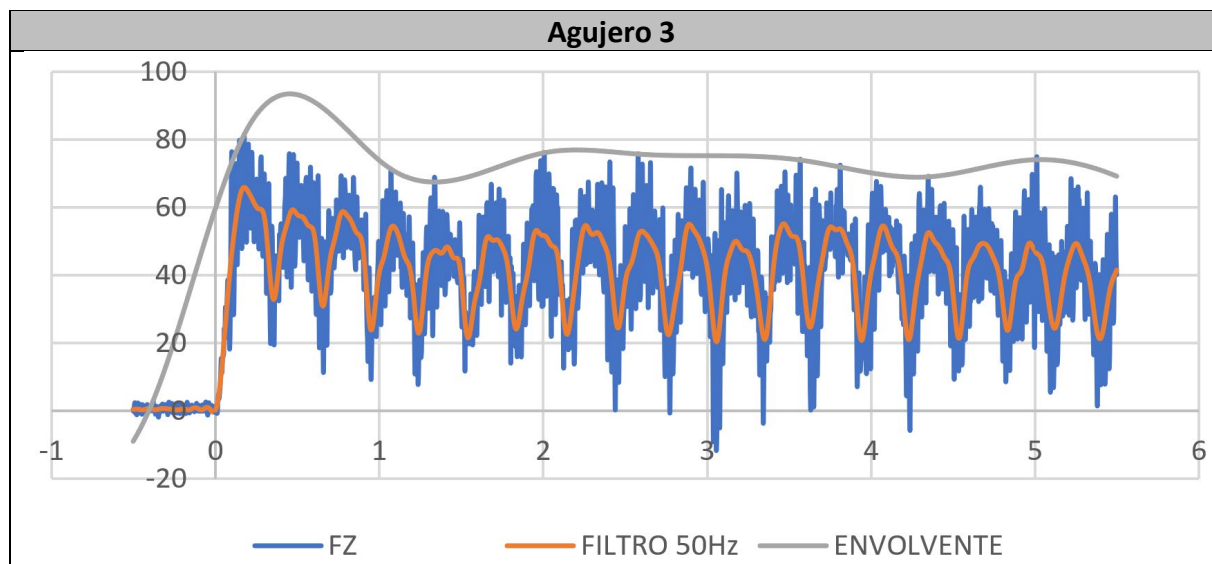
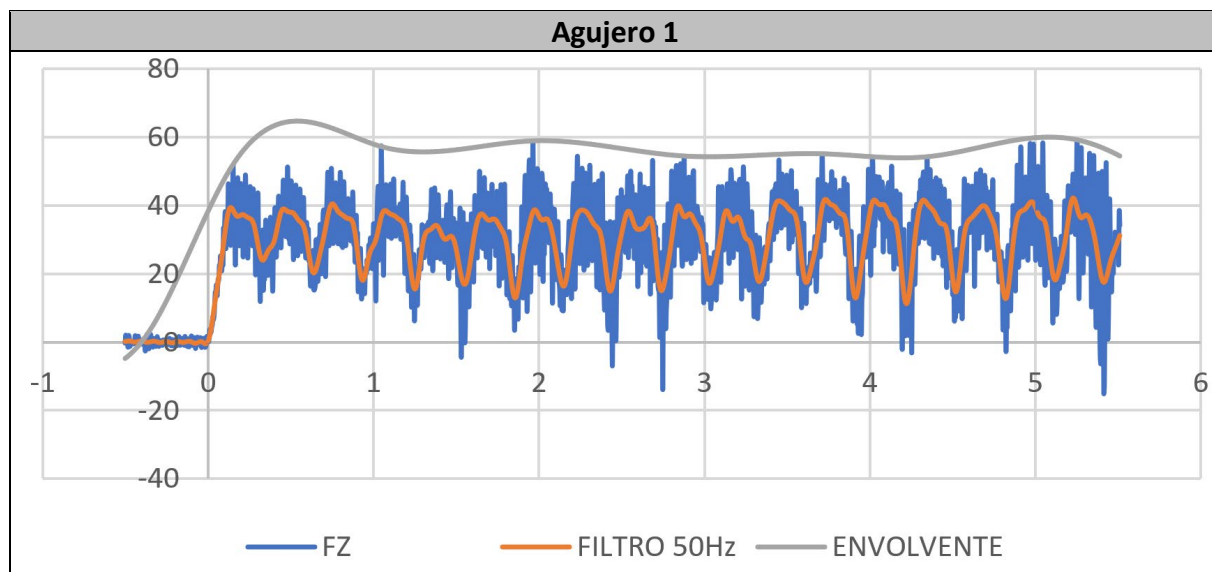
Fuerzas				
Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	31.375 N	44.621 N	55.920 N	60.723 N
Media Envolvente	49.232 N	61.968 N	79.904 N	84.057 N
Valor Máximo	53.792 N	70.502 N	96.880 N	107.987 N
Diferencia Envolvente - Media	17.856 N	17.346 N	23.984 N	23.333 N

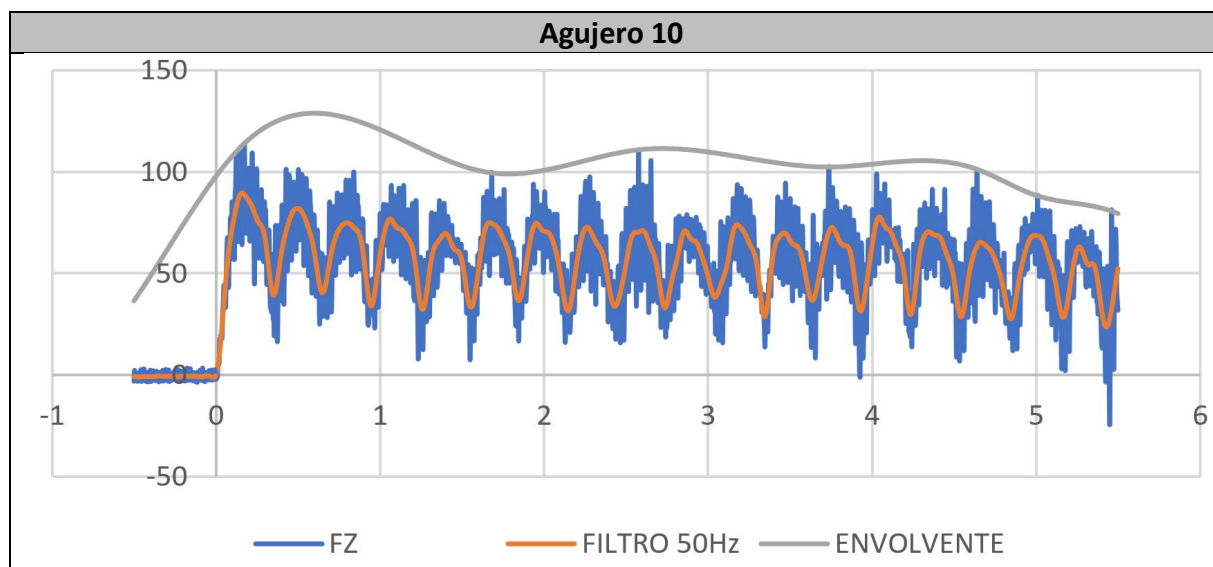
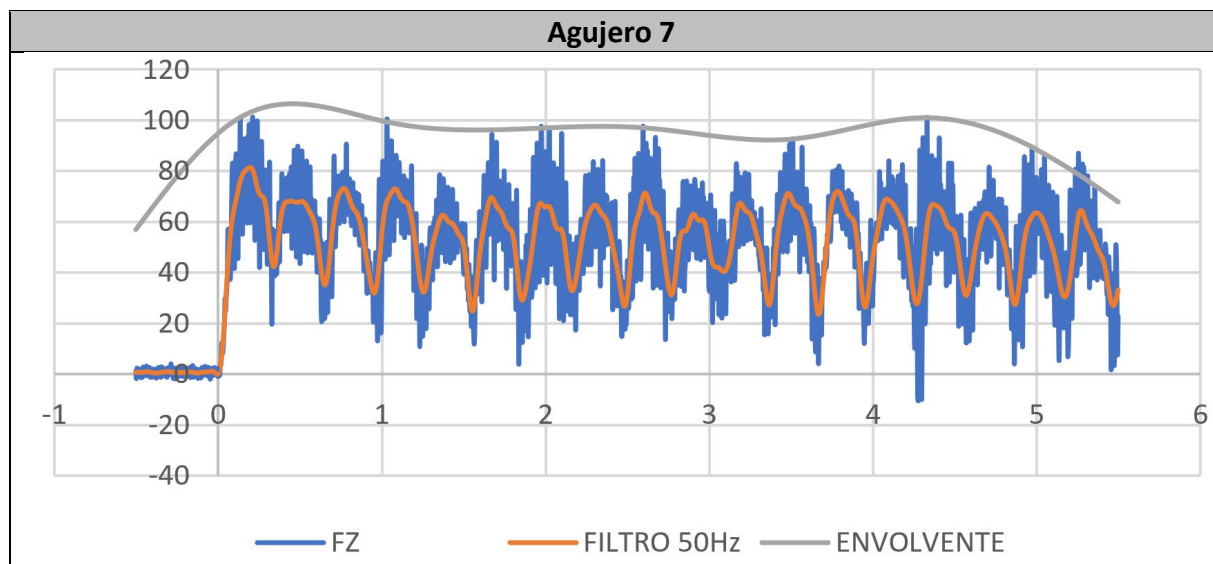




A.8. 8_HM_CFRP_150_60_6_O

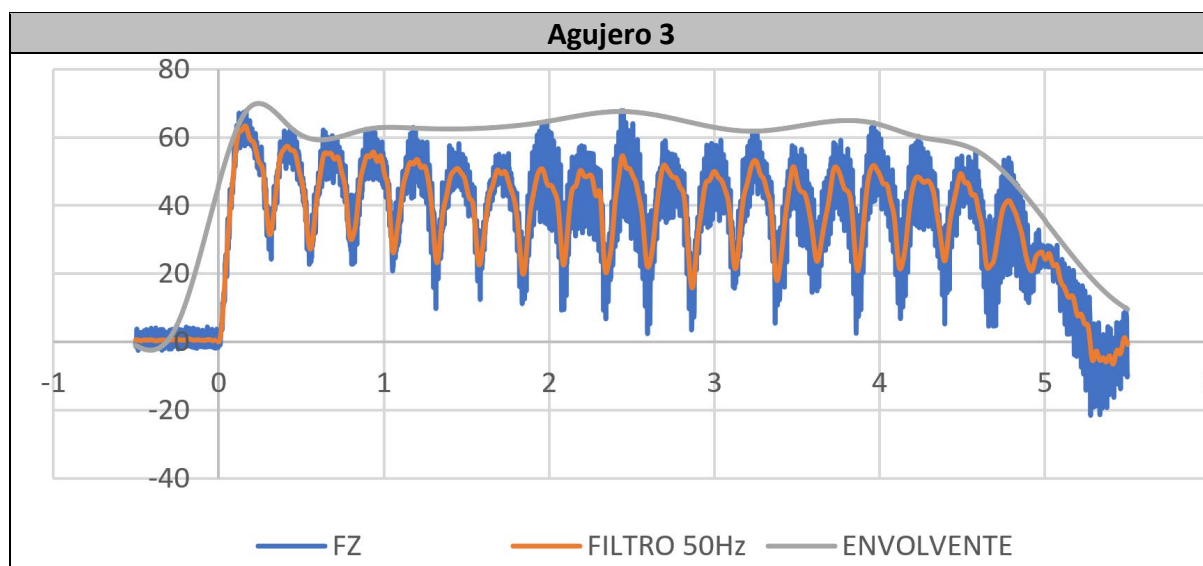
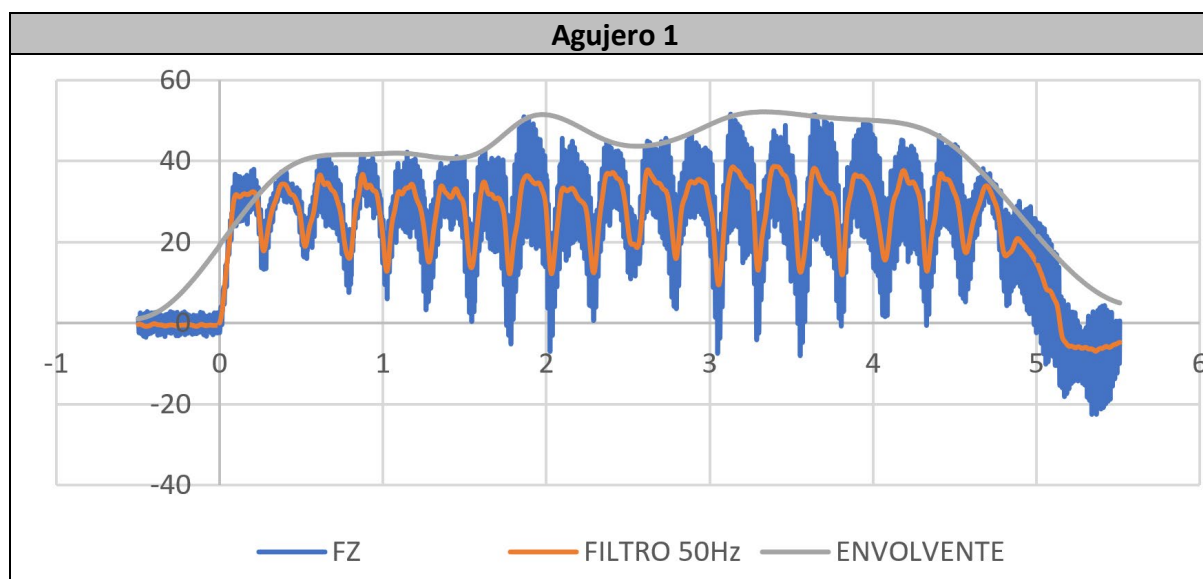
Fuerzas				
Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	30.793 N	43.059 N	54.328 N	58.415 N
Media Envolvente	56.605 N	75.044 N	97.672 N	108.329 N
Valor Máximo	58.815 N	81.453 N	101.058 N	114.032 N
Diferencia Envolvente - Media	25.812 N	31.985 N	43.343 N	49.913 N

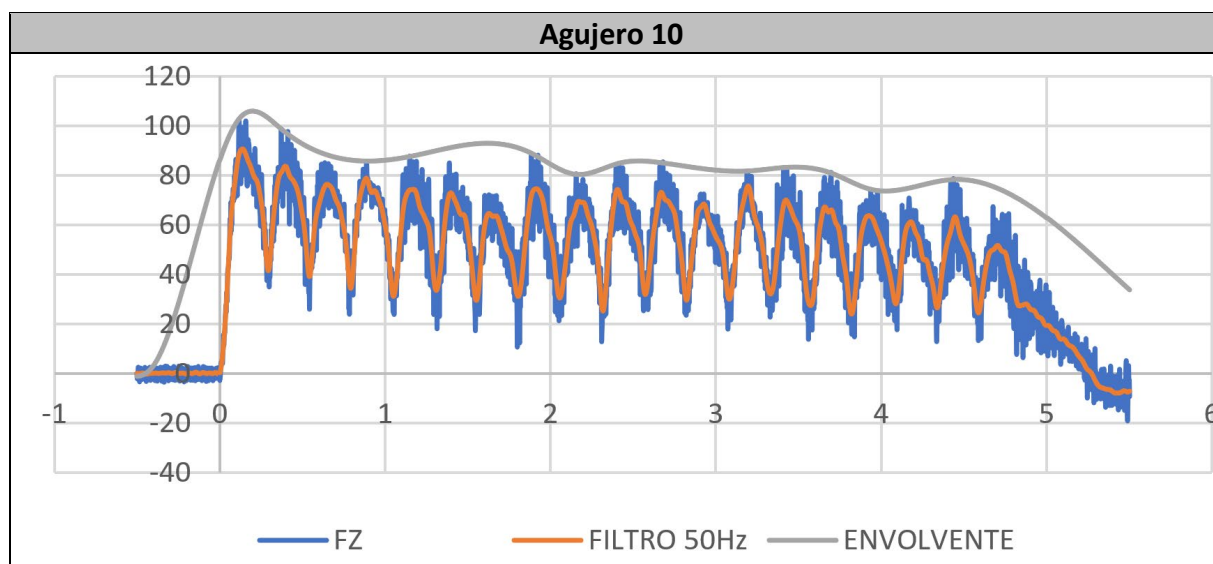
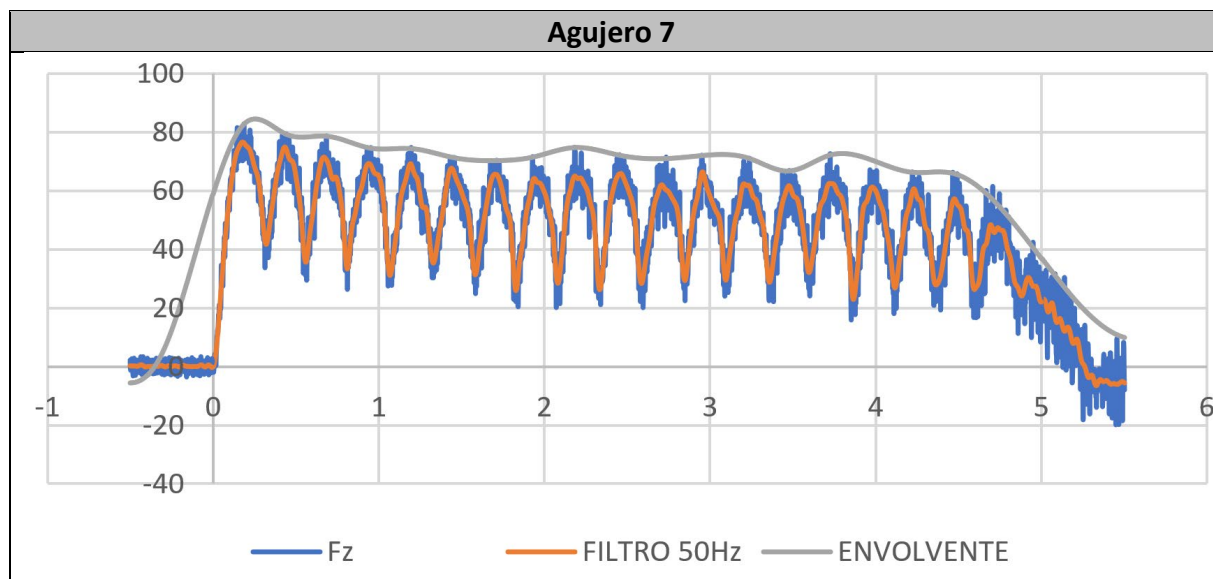




A.9. 9_HM_CFRP_112.5_45_4.5_C

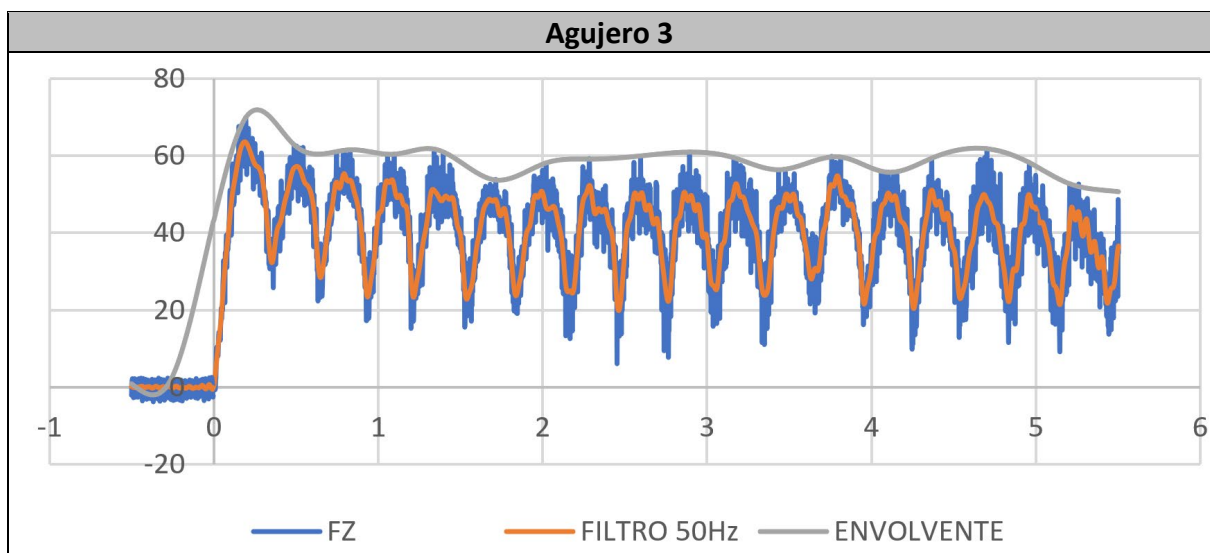
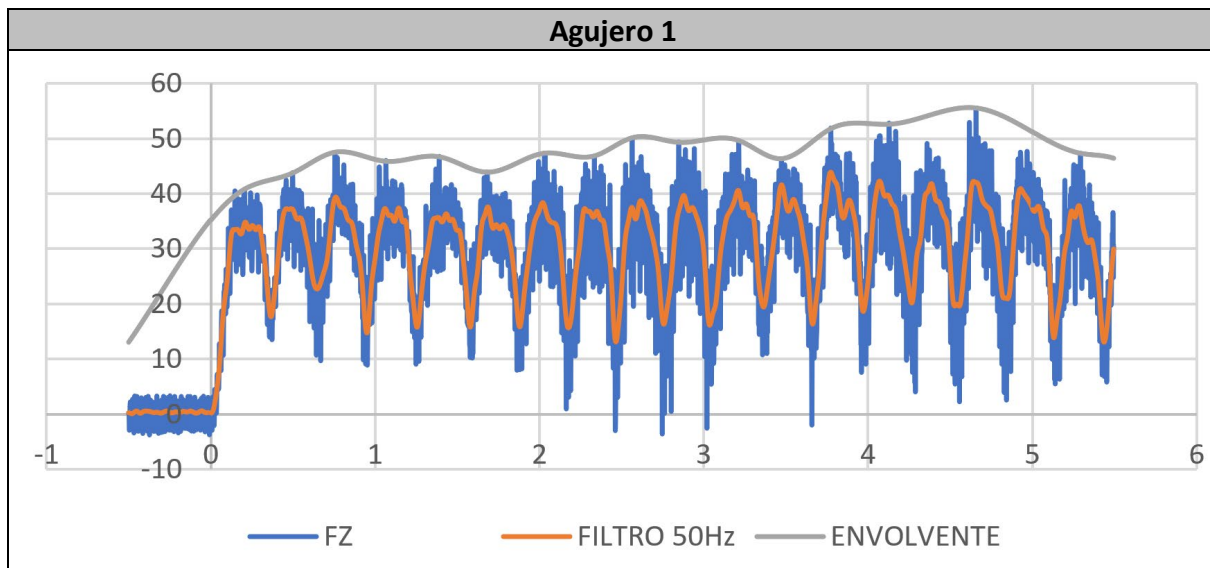
Fuerzas				
Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	28.097 N	41.198 N	50.800 N	54.446 N
Media Envolvente	43.598 N	61.830 N	70.663 N	84.259 N
Valor Máximo	50.962 N	67.618 N	76.545 N	105.737 N
Diferencia Envolvente - Media	15.500 N	20.632 N	19.862 N	29.812 N



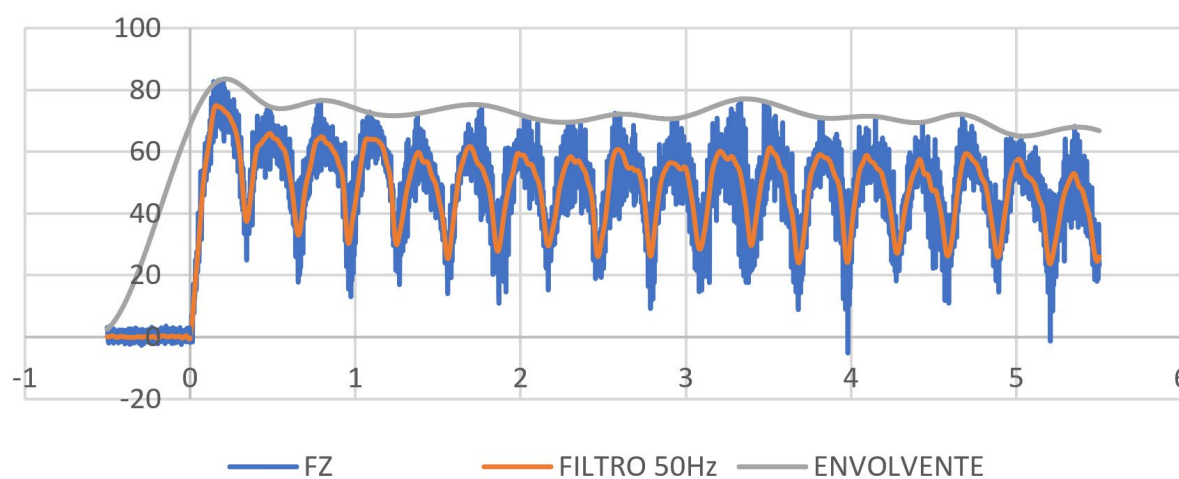


A.10. 10_HM_CFRP_112.5_45_4.5_O

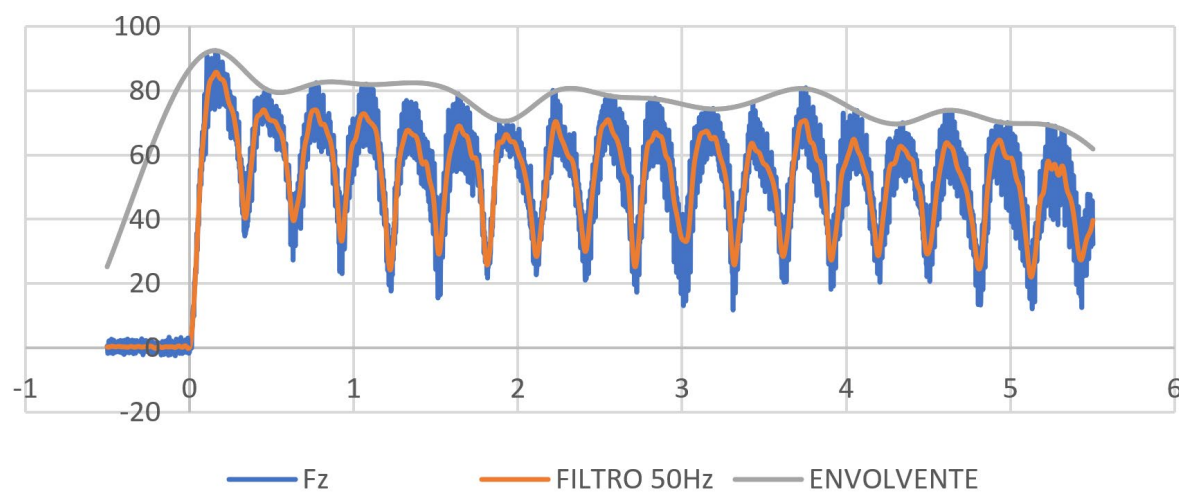
Fuerzas				
Datos	Agujero 1	Agujero 3	Agujero 7	Agujero 10
Media	31.049 N	41.694 N	49.472 N	54.862 N
Media Envolvente	48.289 N	59.641 N	72.976 N	84.632 N
Valor Máximo	55.566 N	69.861 N	82.847 N	92.425 N
Diferencia Envolvente - Media	17.239 N	17.947 N	23.504 N	29.769 N



Agujero 7



Agujero 10

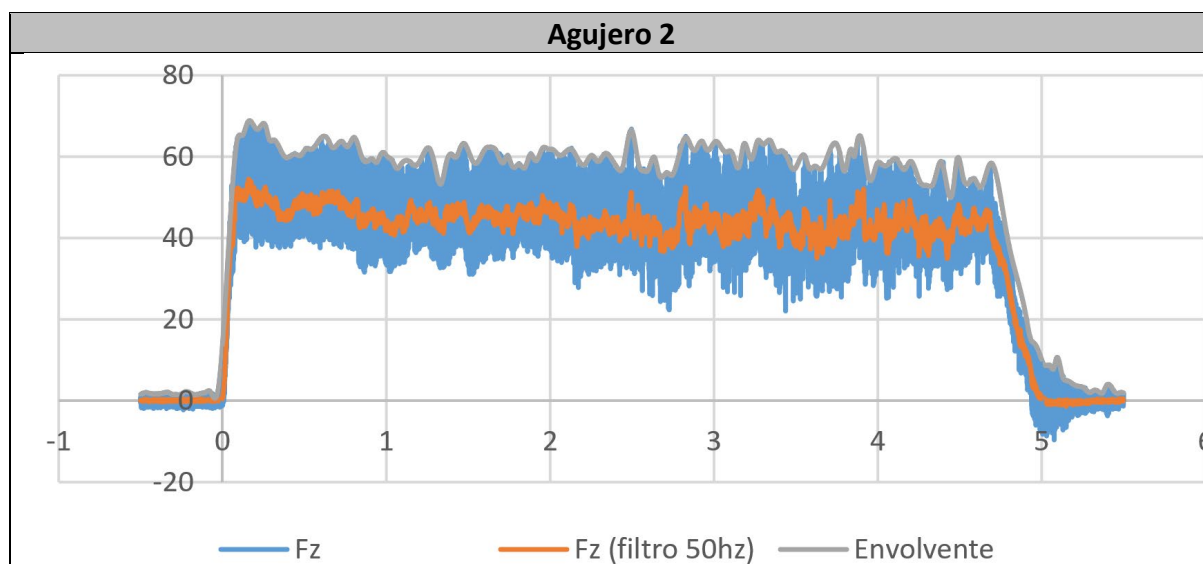
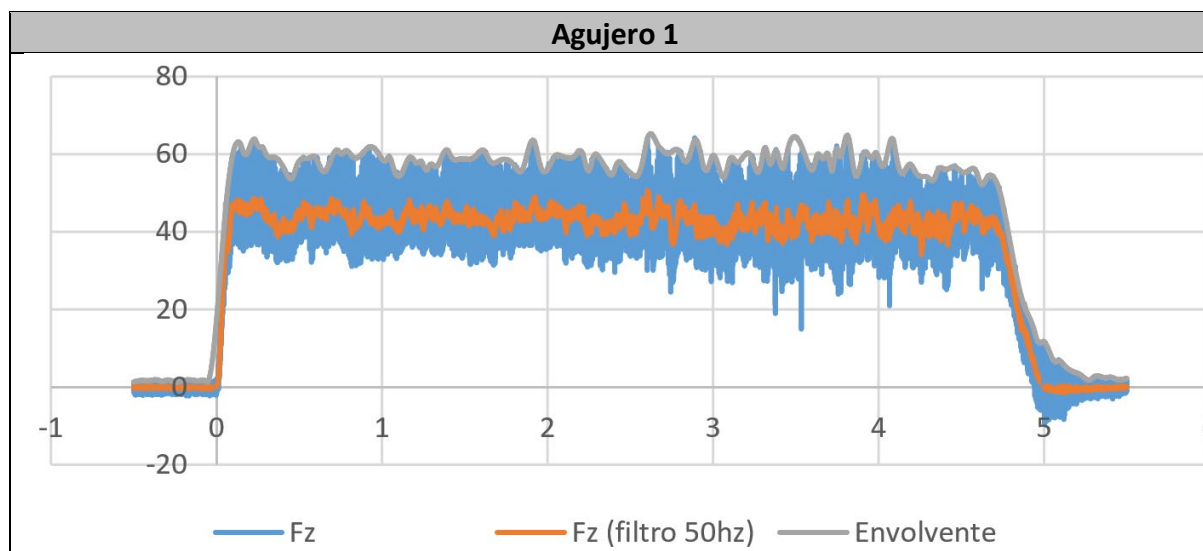


B. Resultado de fuerzas en los ensayos de titanio

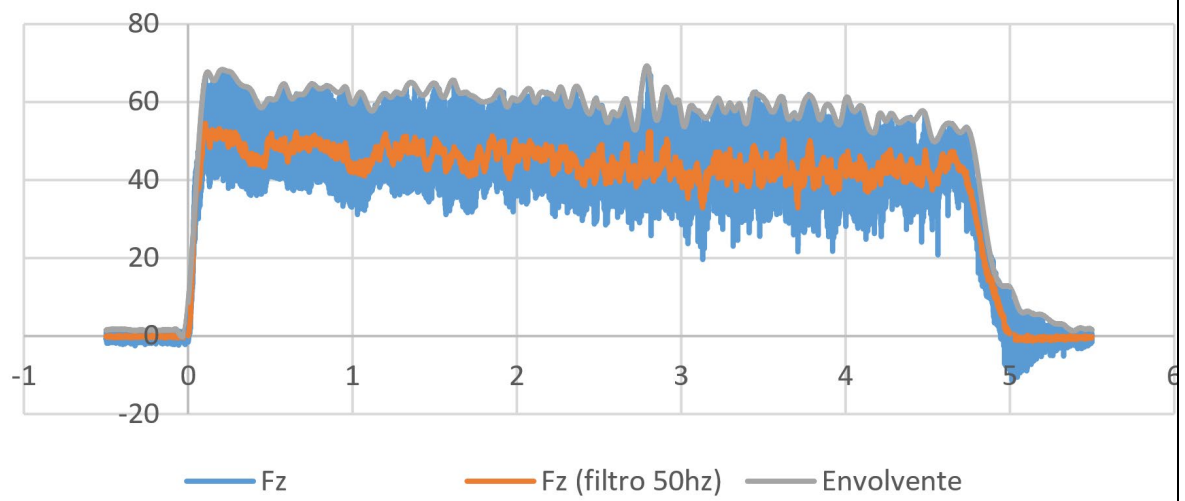
B.1. Fase 1

B.1.1. 1_HM_Ti_80_15_0.5_C

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	41.620 N	42.848 N	43.062 N
Media Envolvente	56.404 N	57.892 N	57.921 N
Valor Máximo	64.829 N	68.523 N	68.407 N
Diferencia Envolvente - Media	14.783 N	15.044 N	14.859 N

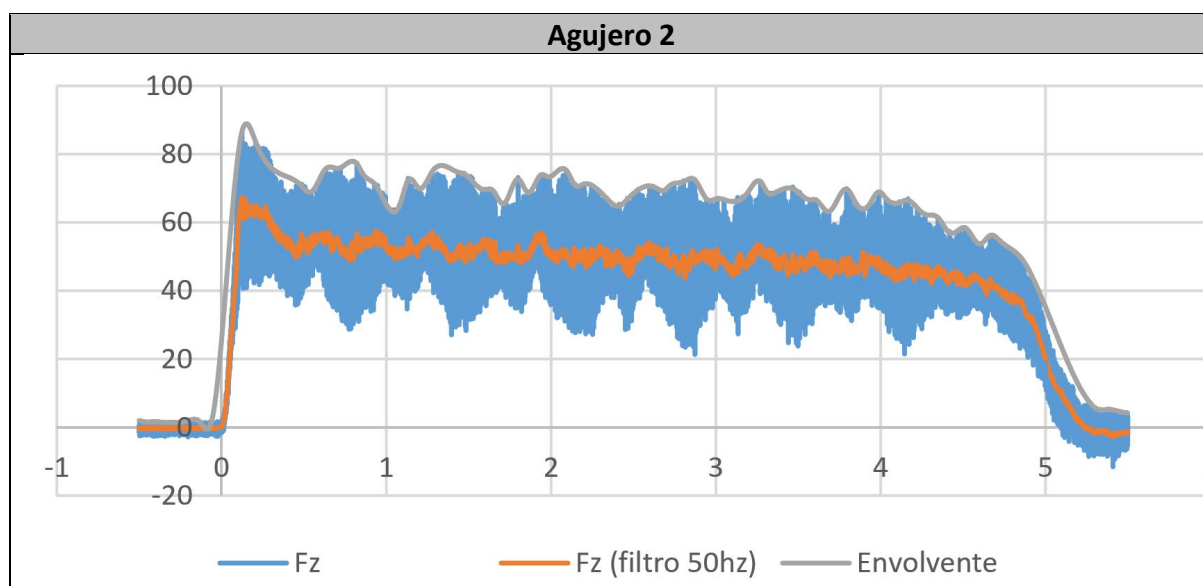
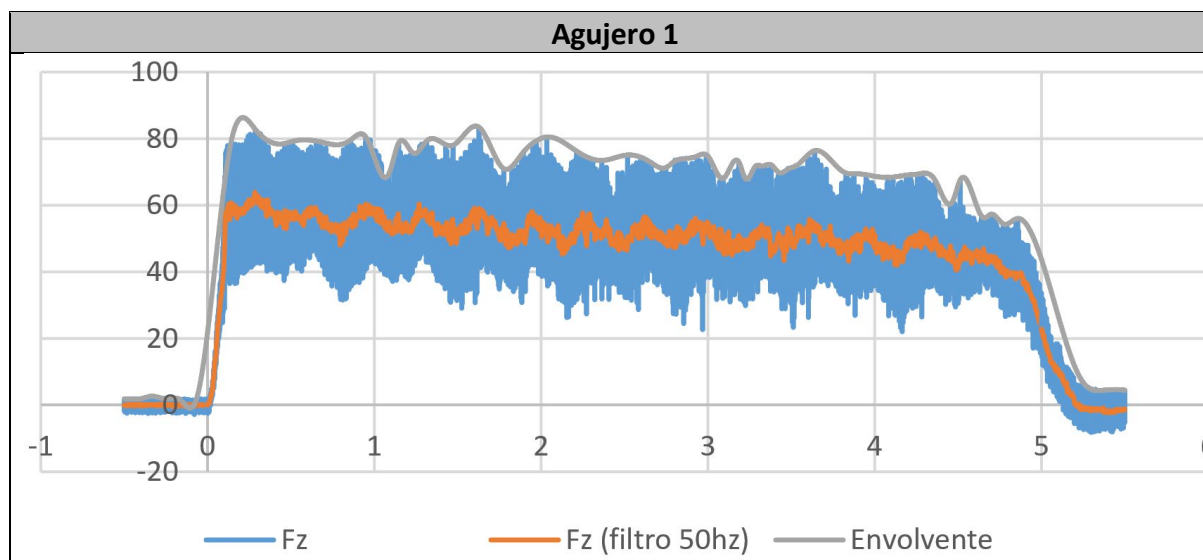


Agujero 3

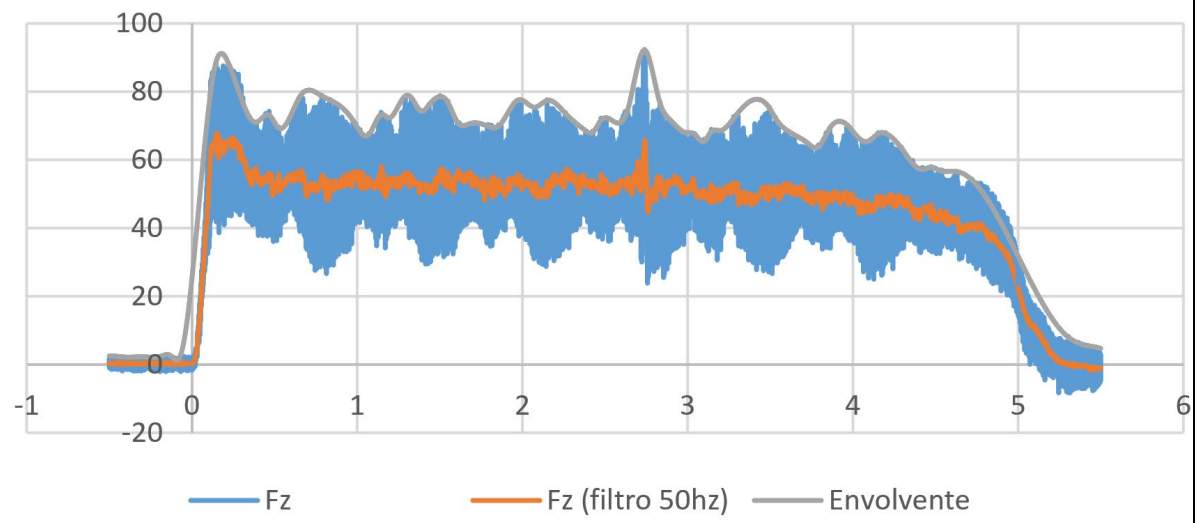


B.1.2. 2_HM_Ti_160_15_1_O

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	50.356 N	48.757 N	50.115 N
Media Envolvente	72.350 N	67.777 N	69.823 N
Valor Máximo	83.435 N	86.464 N	92.162 N
Diferencia Envolvente - Media	21.994 N	19.013 N	19.708 N

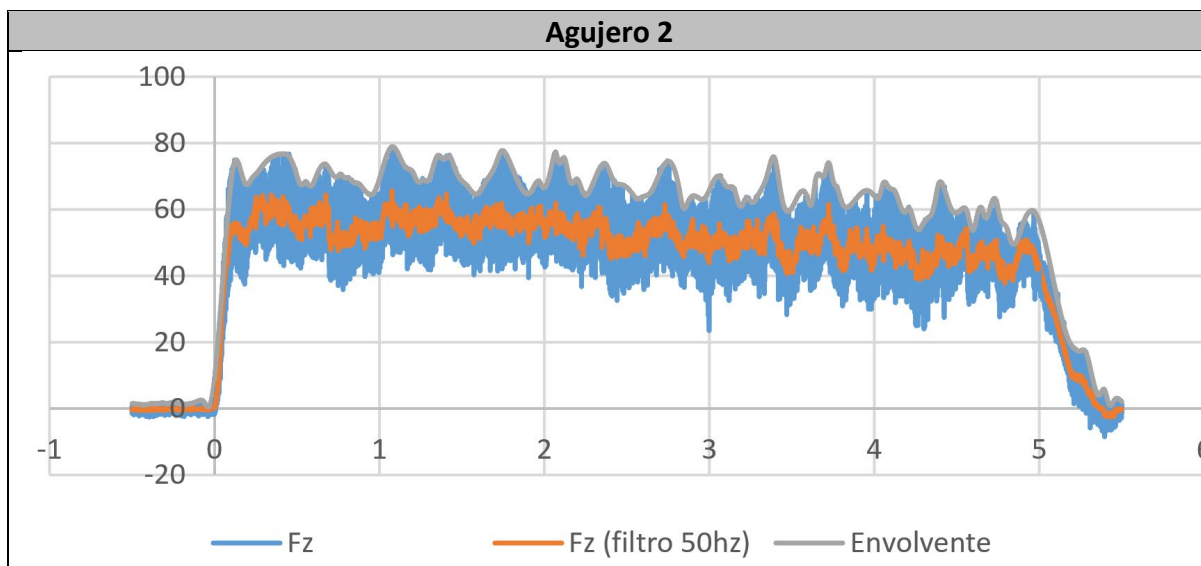
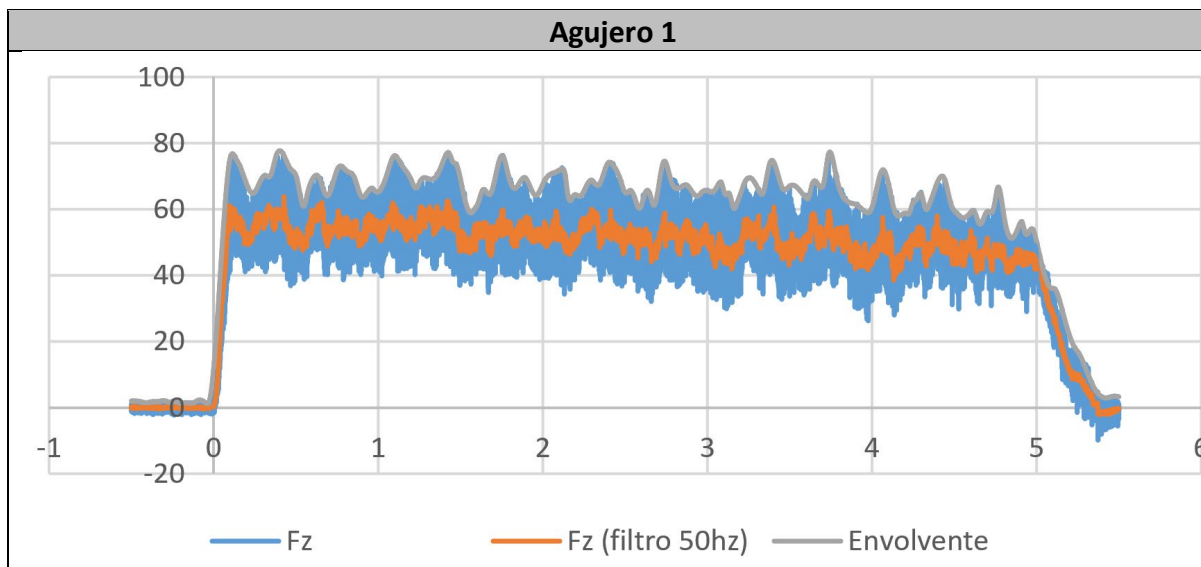


Agujero 3

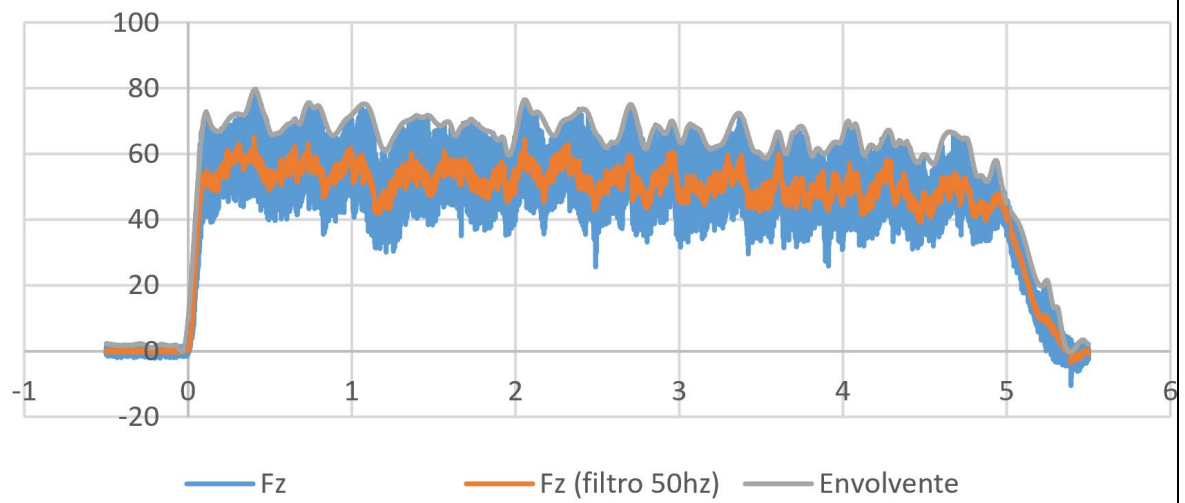


B.1.3. 3_HM_Ti_80_30_0.5_O

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	51.181 N	51.703 N	51.100 N
Media Envolvente	66.005 N	66.405 N	66.057 N
Valor Máximo	77.150 N	78.860 N	79.582 N
Diferencia Envolvente - Media	14.823 N	14.702 N	14.956 N

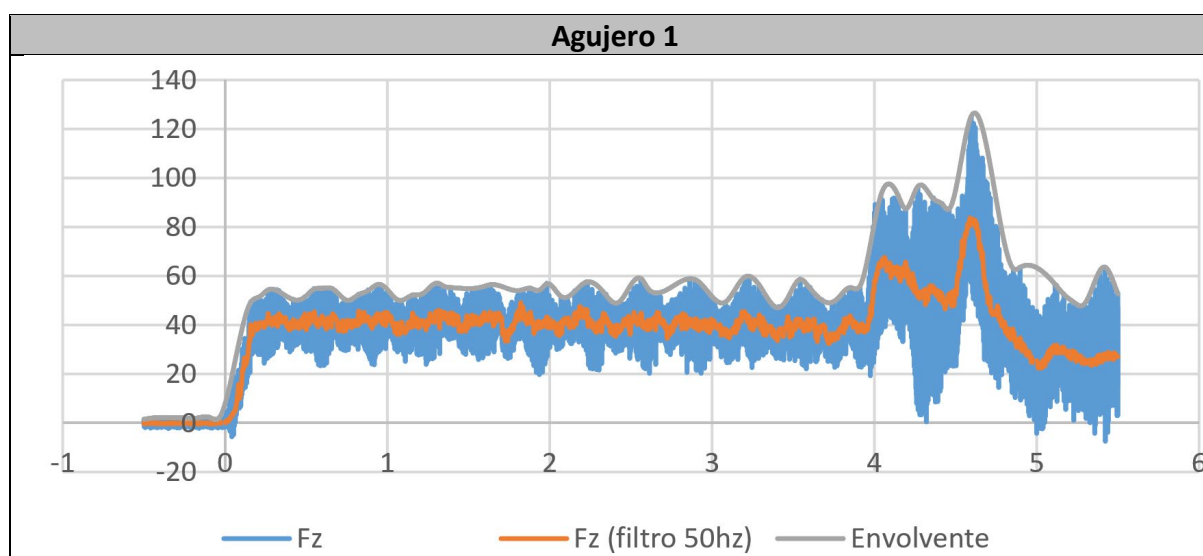


Agujero 3



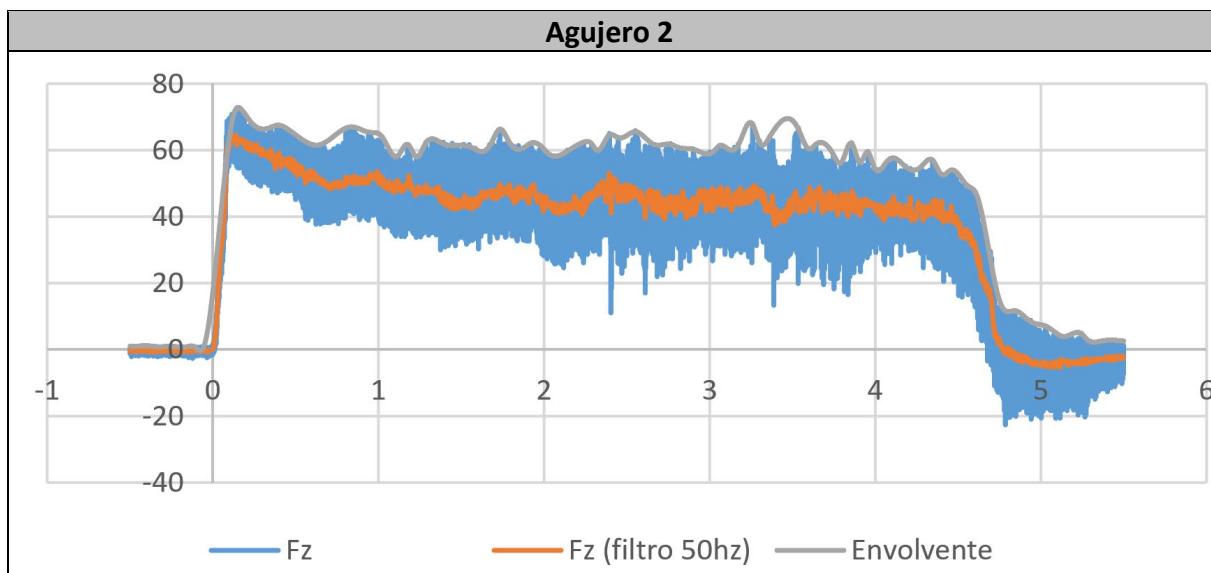
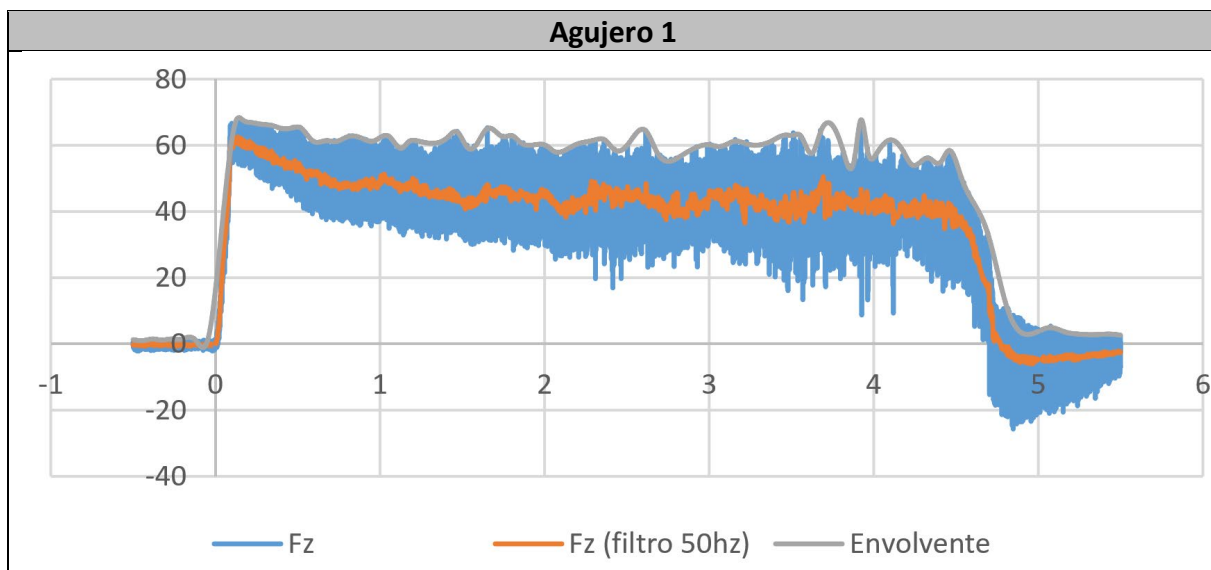
B.1.4. 4_HM_Ti_160_30_0.5_C

Fuerzas		
Datos	Agujero 1	Hasta 3.95 mm
Media	42.332 N	39.462 N
Media Envolvente	60.884 N	52.985 N
Valor Máximo	125.026 N	64.423 N
Diferencia Envolvente - Media	18.552 N	13.522 N
NOTA	La herramienta se rompe al final del primer fresado.	

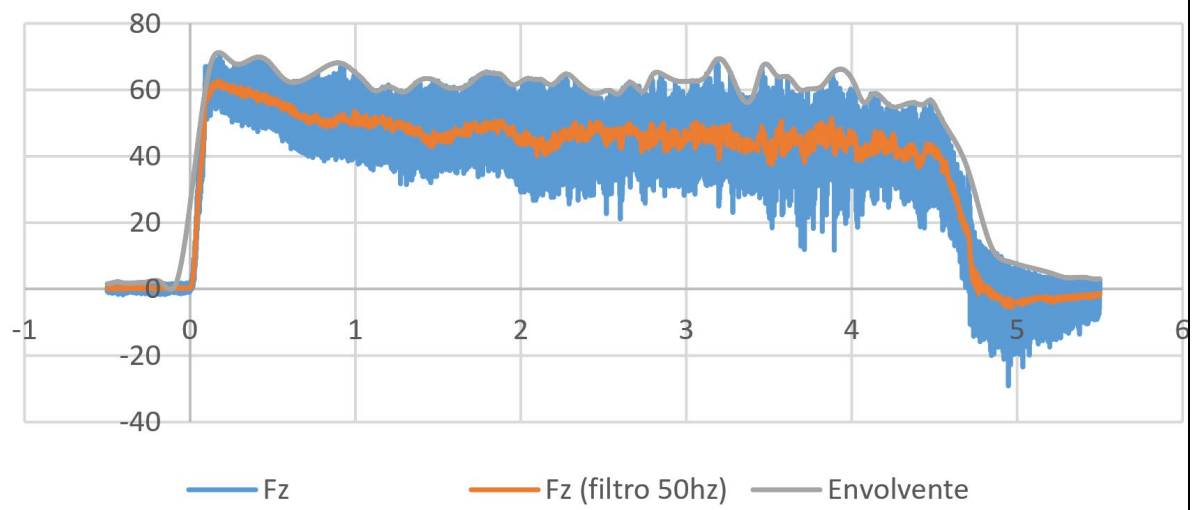


B.1.5. 5_HM_Ti_80_15_1_O

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	41.507 N	42.947 N	43.691 N
Media Envolvente	56.829 N	57.727 N	58.892 N
Valor Máximo	67.808 N	72.412 N	71.141 N
Diferencia Envolvente - Media	15.321 N	14.780 N	15.200 N

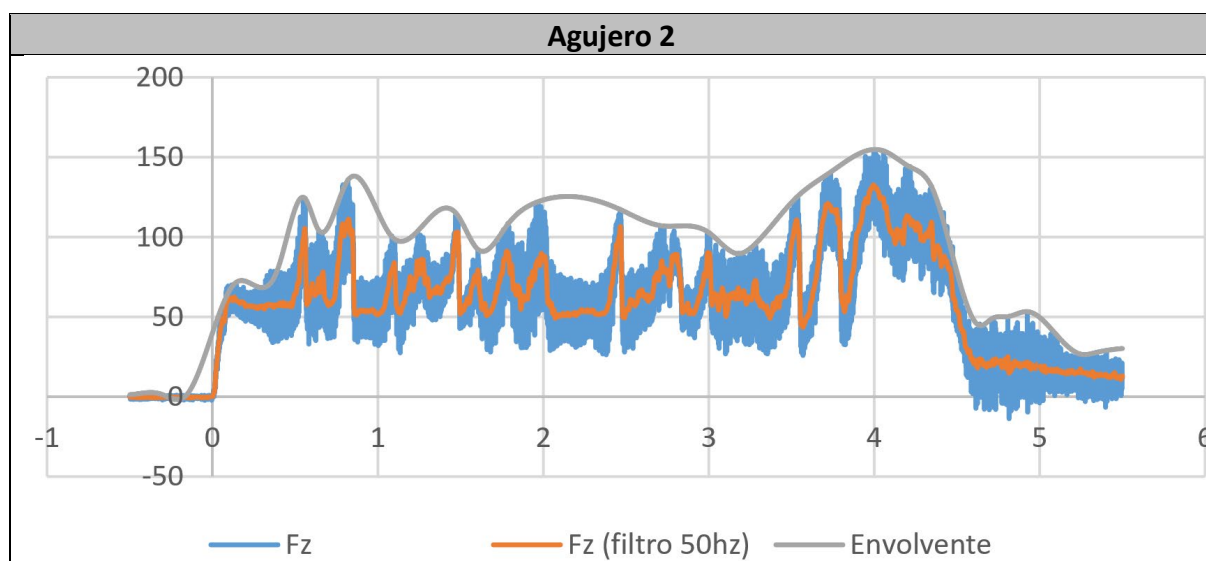
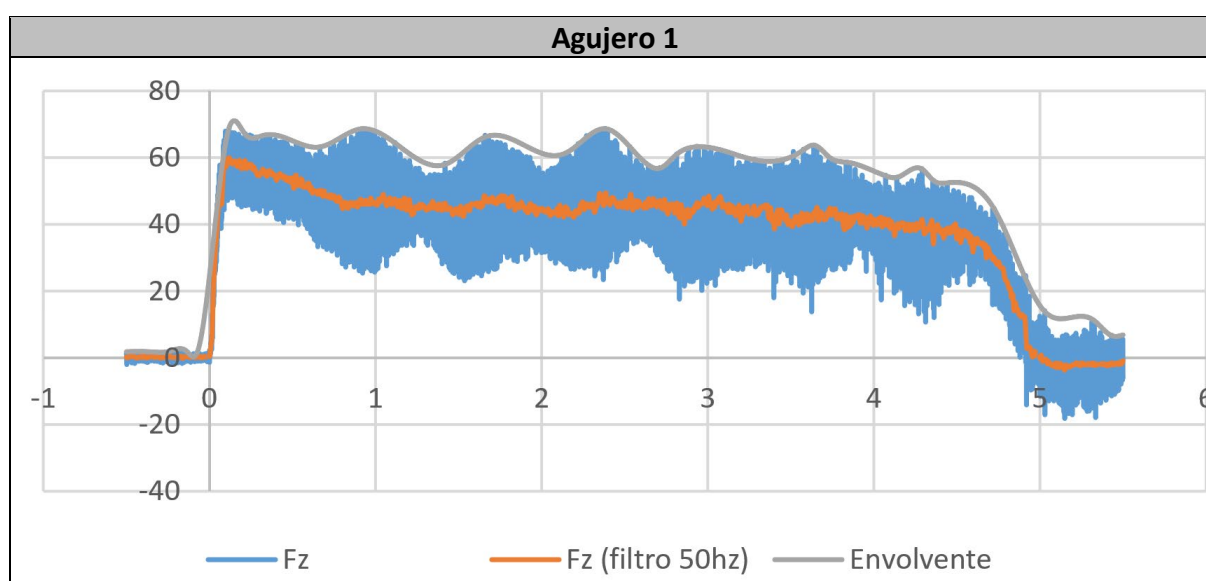


Agujero 3



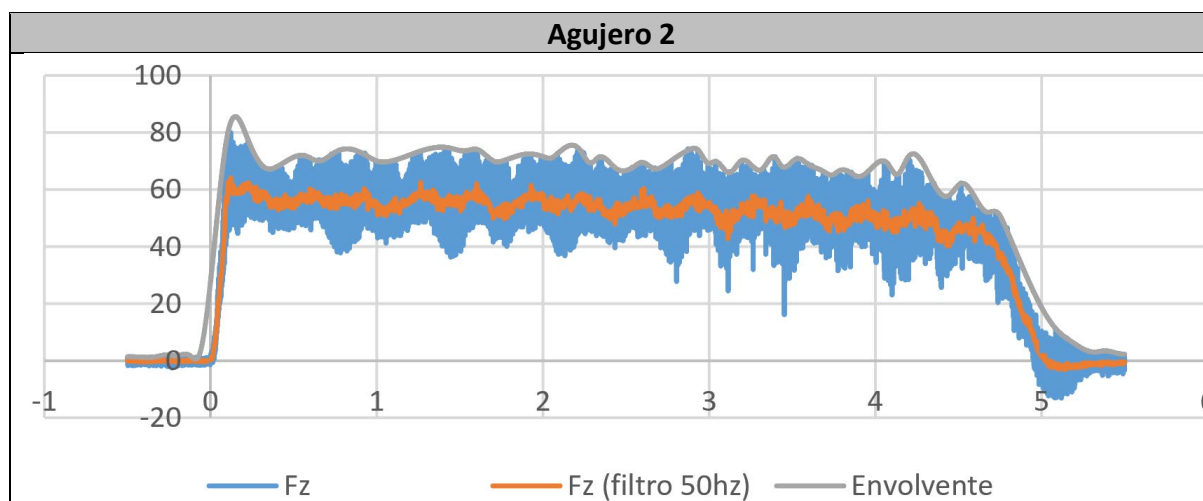
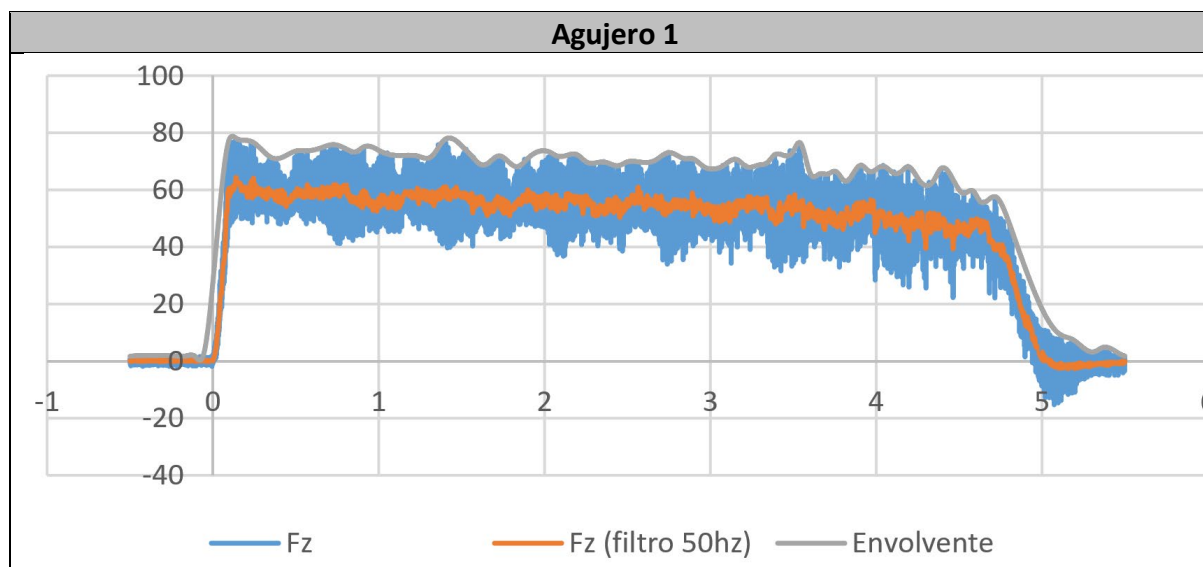
B.1.6. 6_HM_Ti_160_15_1_C

Fuerzas		
Datos	Agujero 1	Agujero 2
Media	43.095 N	66.862 N
Media Envolvente	59.295 N	106.819 N
Valor Máximo	68.749 N	153.902 N
Diferencia Envolvente - Media	16.200 N	39.956 N
NOTA	En el 2 agujero la herramienta se rompe, no pudiendo finalizar el mecanizado.	

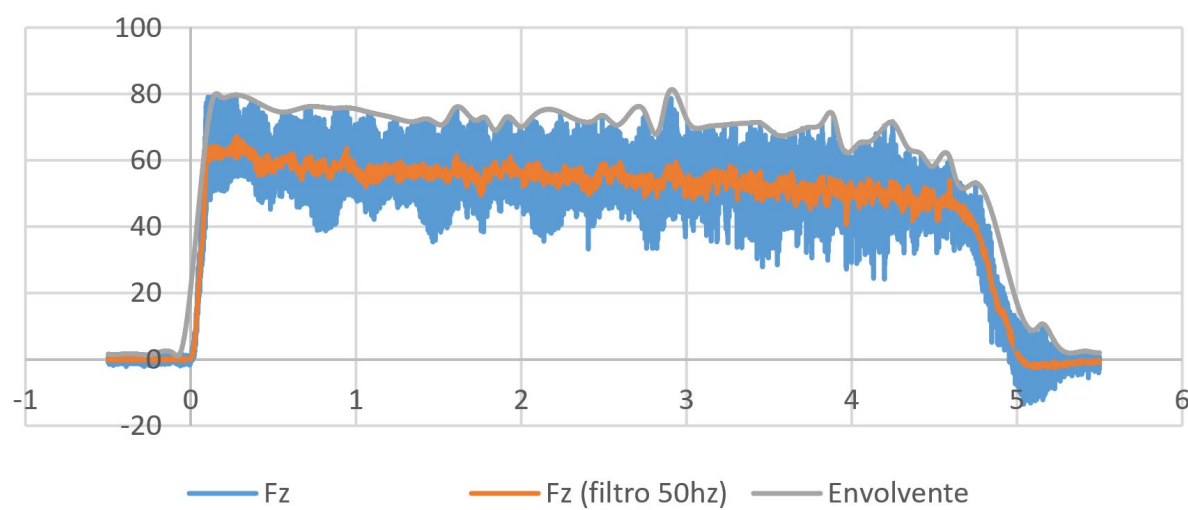


B.1.7. 7_HM_Ti_80_30_1_C

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	51.995 N	50.950 N	52.054 N
Media Envolvente	68.072 N	67.480 N	69.158 N
Valor Máximo	78.115 N	80.163 N	79.423 N
Diferencia Envolvente - Media	16.077 N	16.529 N	17.103 N

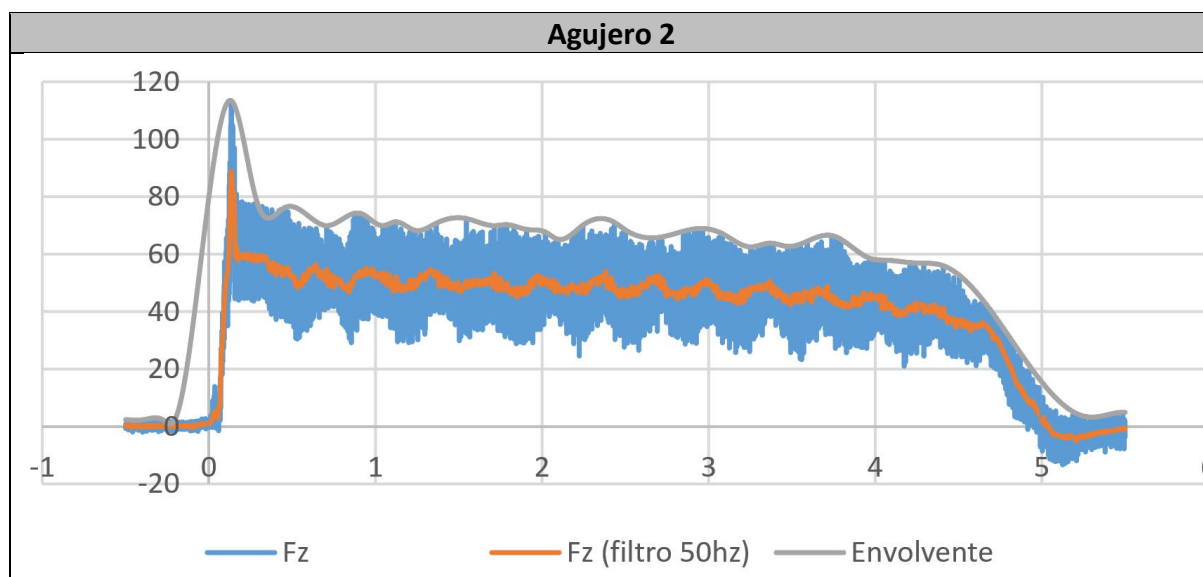
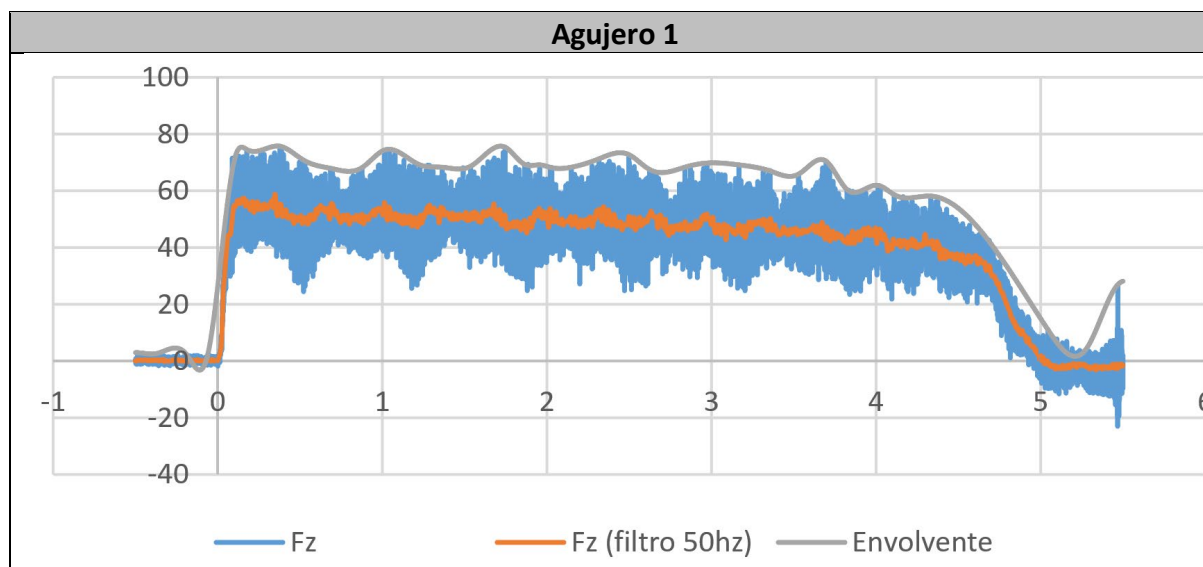


Agujero 3

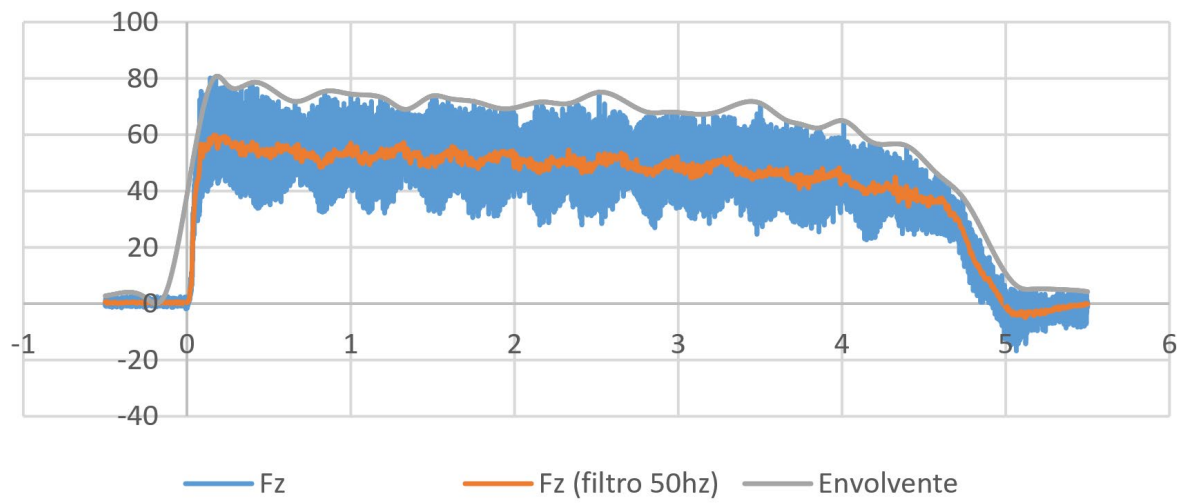


B.1.8. 8_HM_Ti_160_30_1_O

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	45.516 N	45.410 N	46.365 N
Media Envolvente	64.599 N	65.827 N	65.891 N
Valor Máximo	75.663 N	113.401 N	80.633 N
Diferencia Envolvente - Media	19.082 N	20.417 N	19.525 N



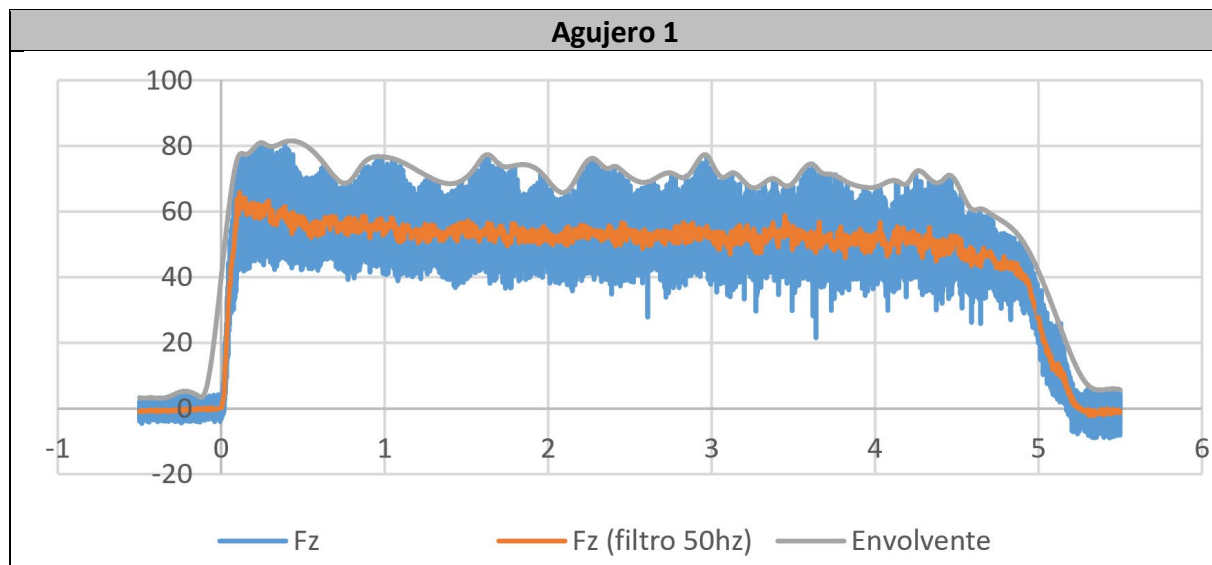
Agujero 3



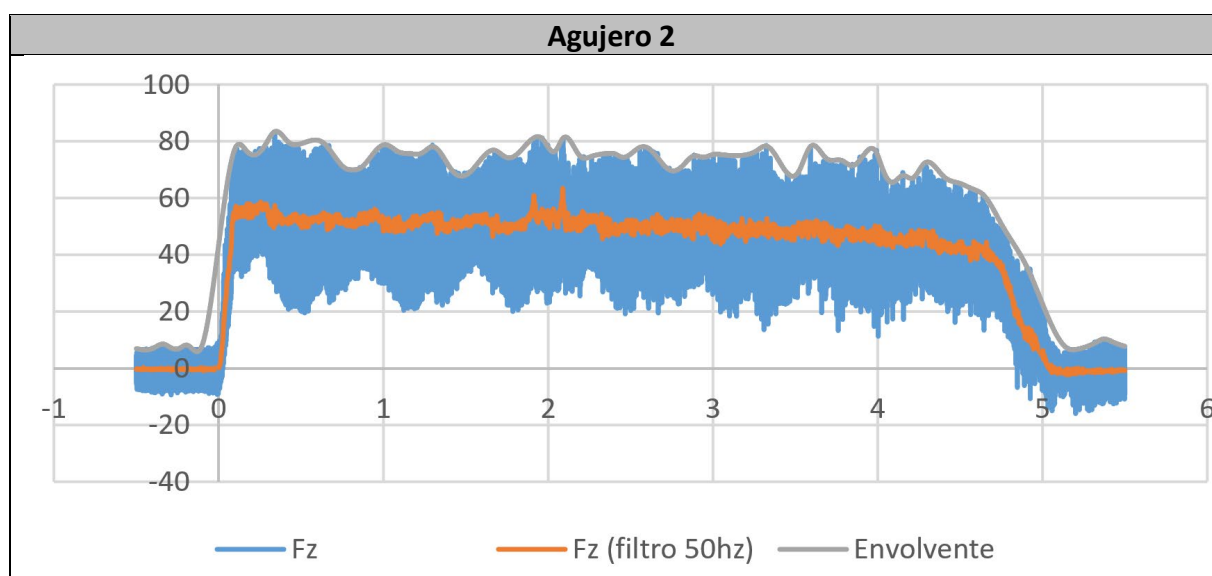
B.1.9. 9_HM_Ti_120_22.5_0.75_C

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	52.025 N	47.577 N	48.159 N
Media Envolvente	70.509 N	71.852 N	72.423 N
Valor Máximo	81.171 N	83.355 N	87.963 N
Diferencia Envolvente - Media	18.483 N	24.274 N	24.263 N

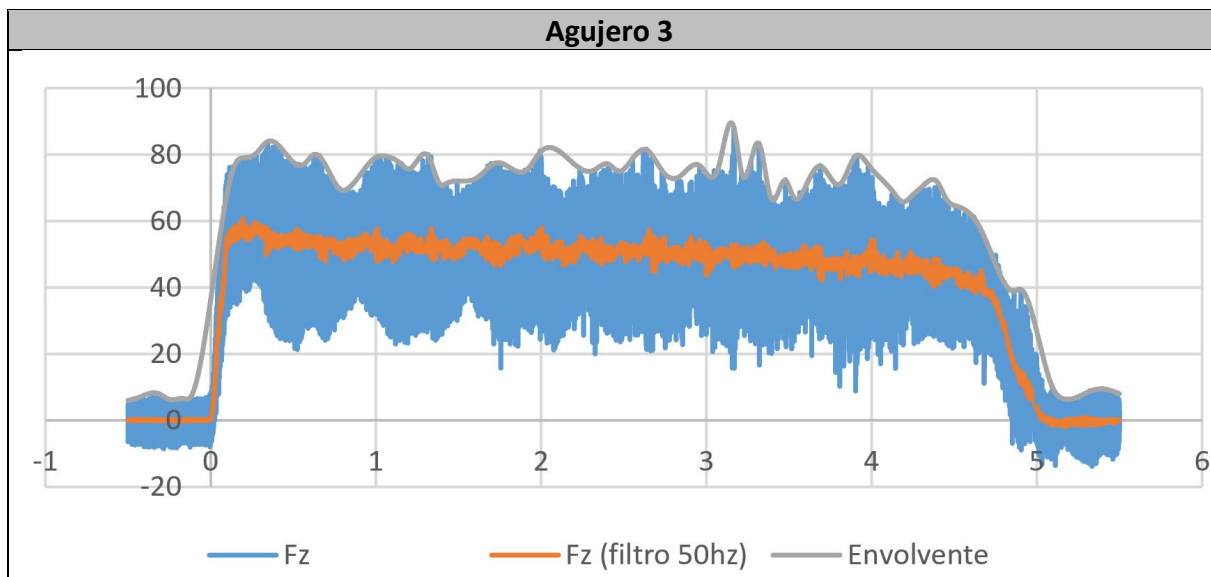
Esta tanda de ensayos se rechazó por problemas de vibraciones.



Es la misma herramienta que se utilizó para el ensayo en oposición, es decir, es su 3º agujero



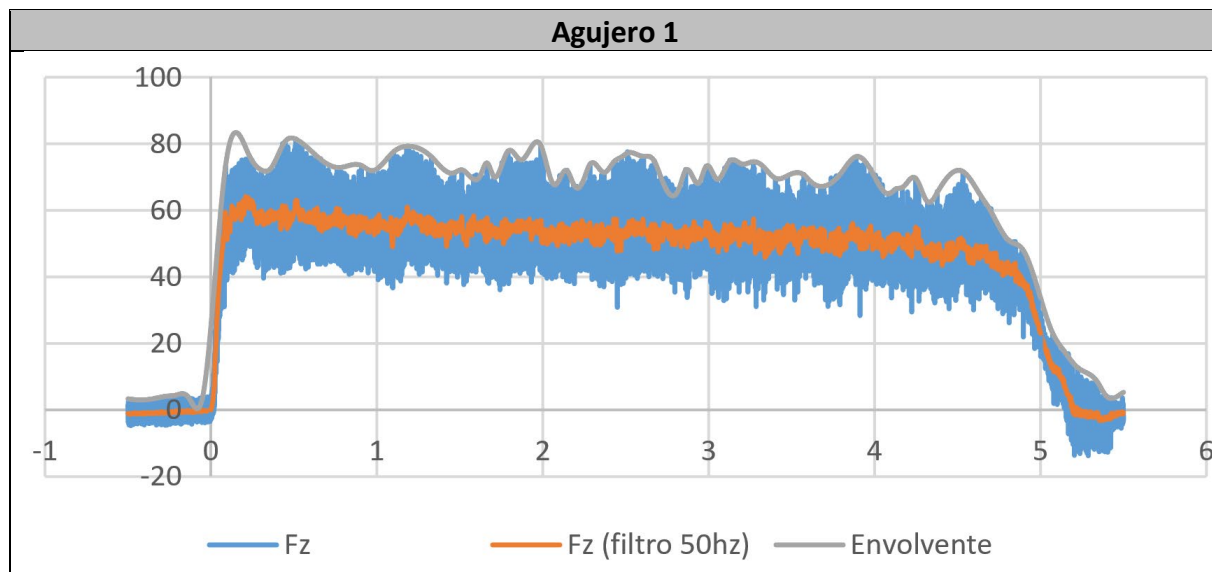
Es la misma herramienta que se utilizó para el ensayo en oposición, es decir, es su 4º agujero



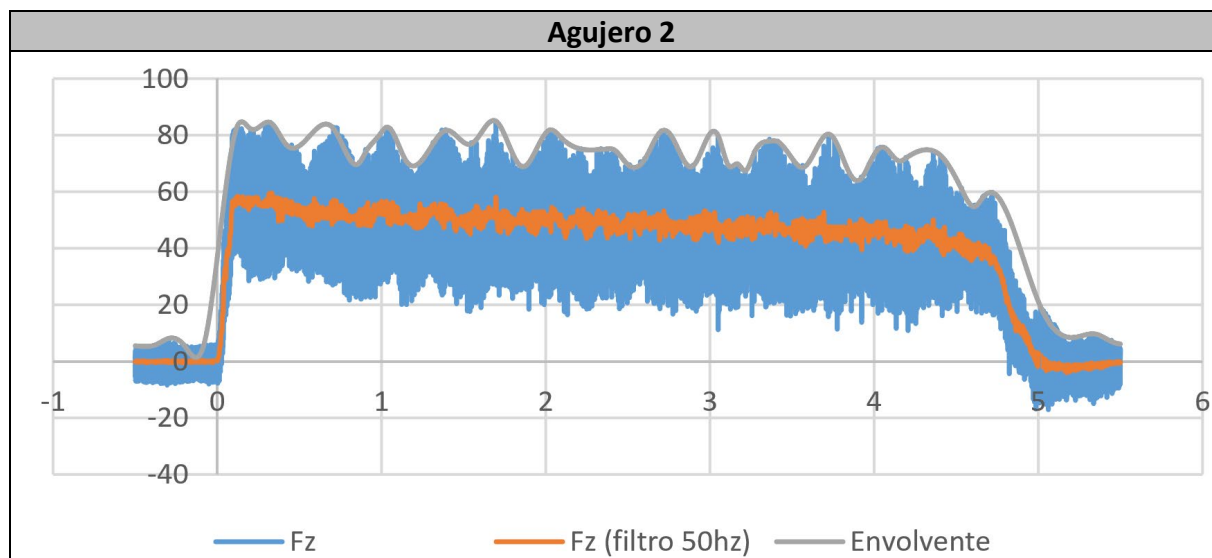
B.1.10. 10_HM_Ti_120_22.5_0.75_O

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	52.098 N	46.607 N	47.127 N
Media Envolvente	70.776 N	72.749 N	72.387 N
Valor Máximo	81.342 N	84.923 N	85.309 N
Diferencia Envolvente - Media	18.677 N	26.141 N	25.260 N

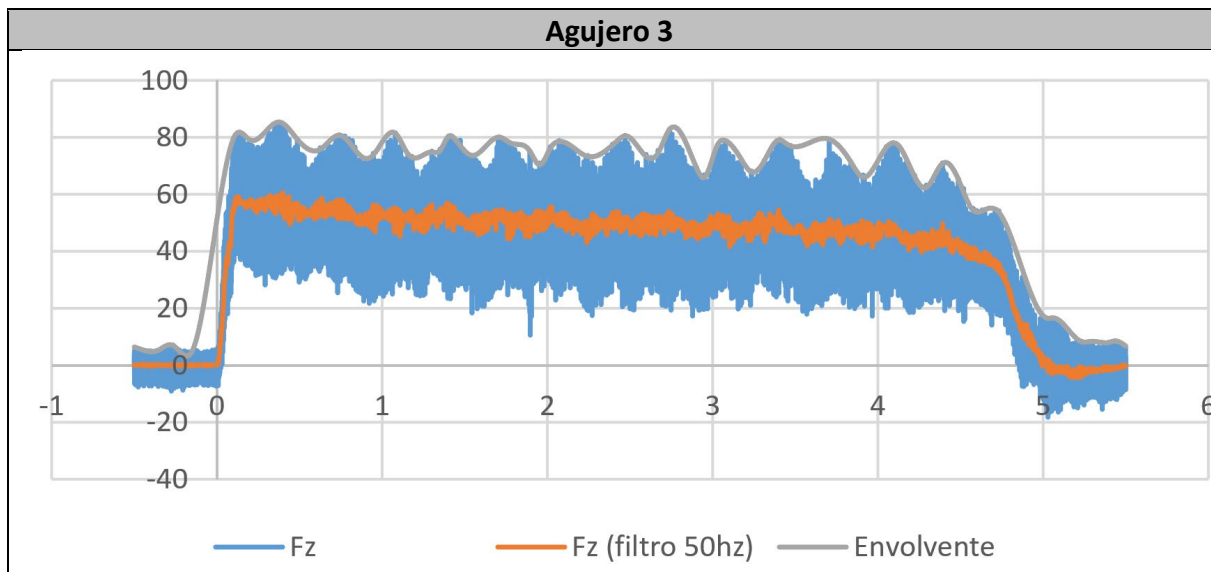
Esta tanda de ensayos se rechazó por problemas de vibraciones.



Es la misma herramienta que se utilizó para el ensayo en concordancia, es decir, 5º agujero



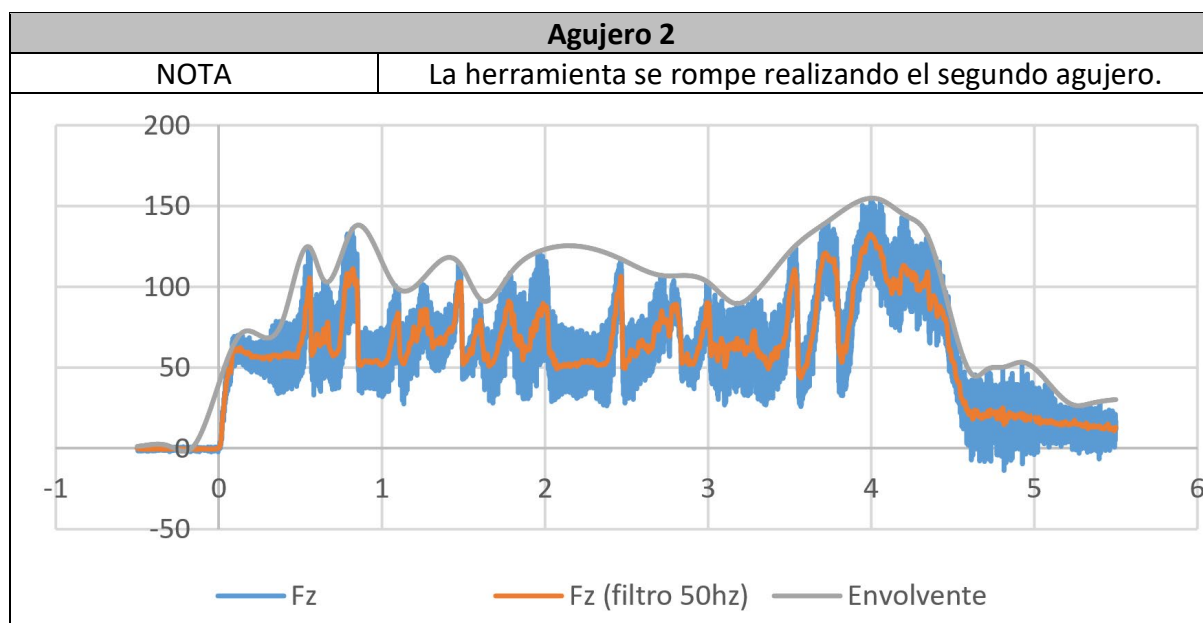
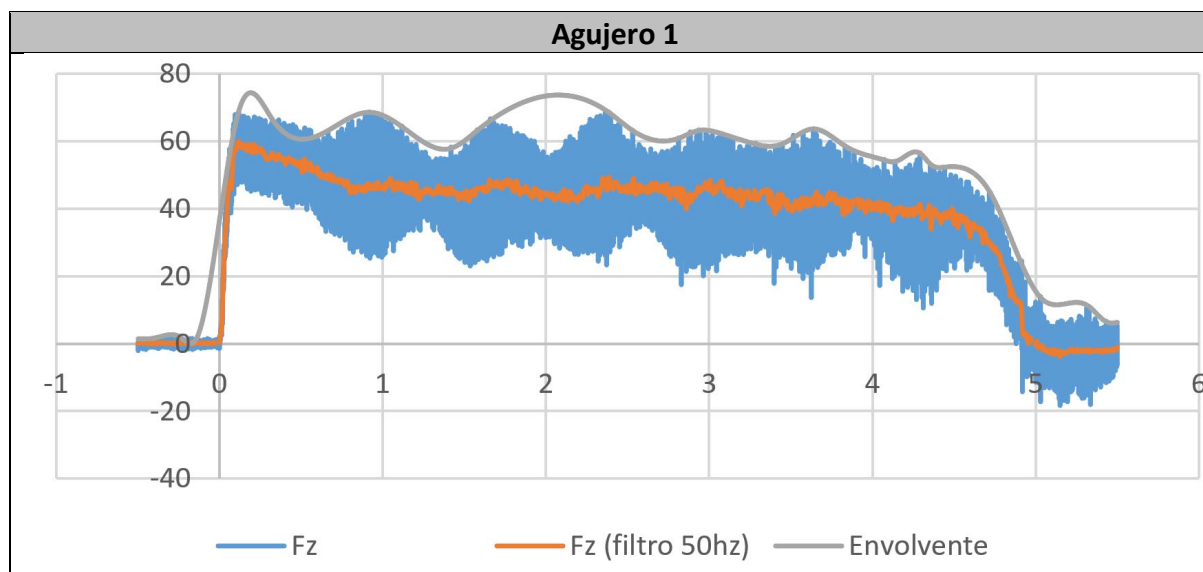
Es la misma herramienta que se utilizó para el ensayo en concordancia, es decir, 6º agujero



B.2. Fase 2

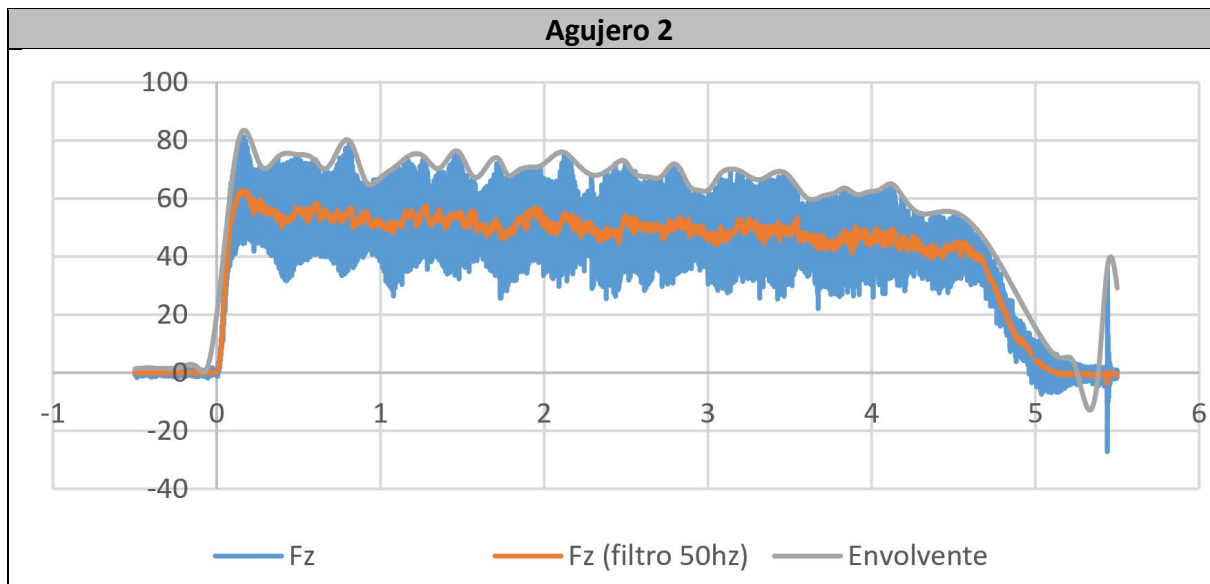
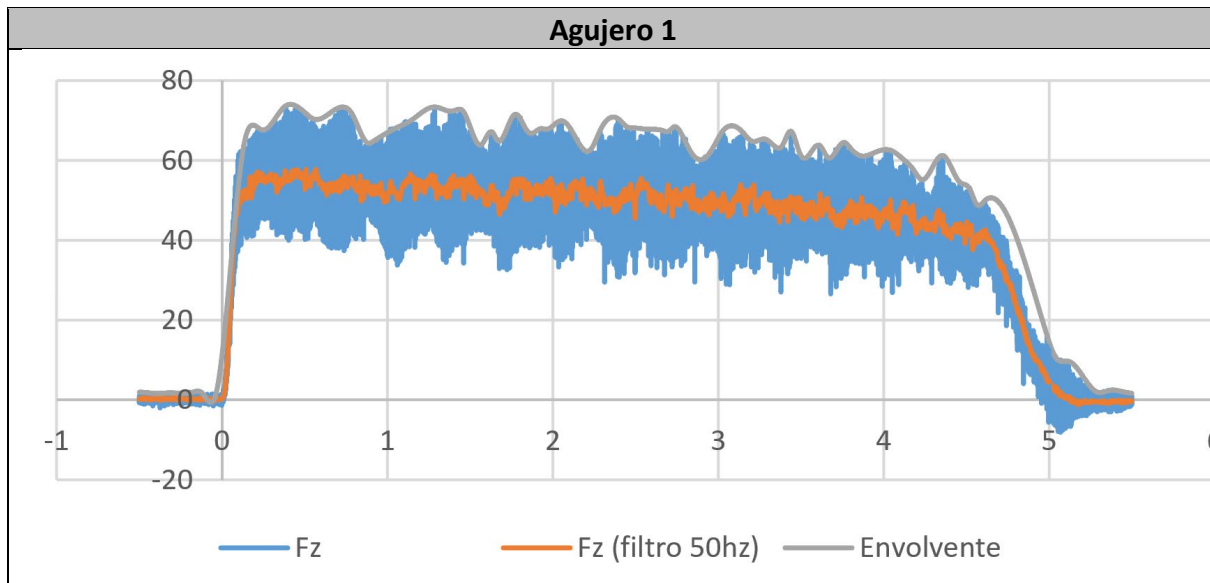
B.2.1. Repetición 6_HM_Ti_160_15_1_C

Fuerzas		
Datos	Agujero 1	Agujero 2
Media	42.982 N	66.863 N
Media Envolvente	60.442 N	106.819 N
Valor Máximo	68.510 N	153.902 N
Diferencia Envolvente - Media	17.459 N	39.955 N

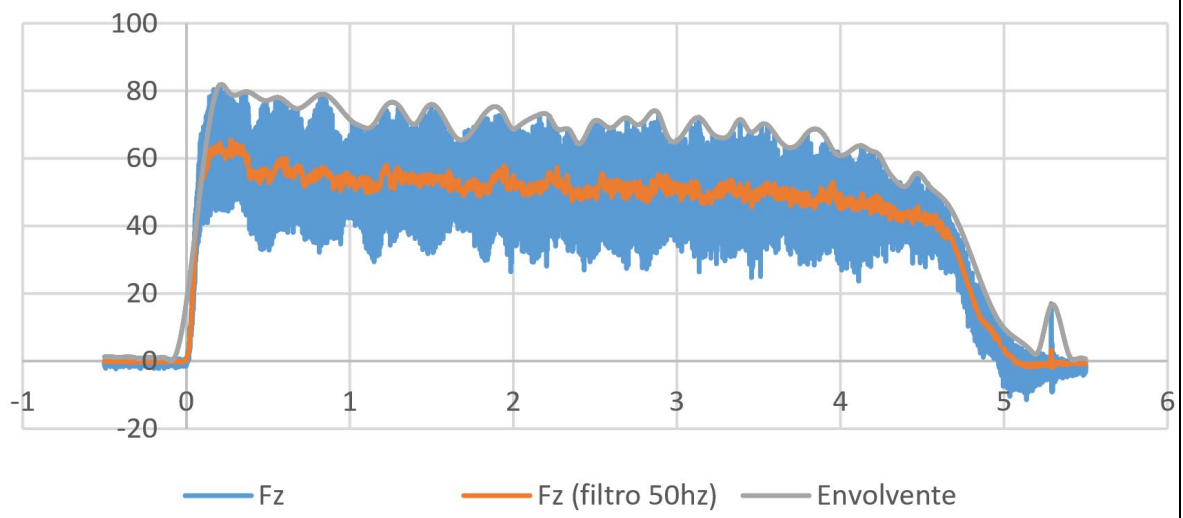


B.2.2. 2_HM_Ti_160_15_1_C

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	47.741 N	47.521 N	48.036 N
Media Envolvente	63.001 N	65.204 N	65.670 N
Valor Máximo	73.681 N	82.029 N	81.695 N
Diferencia Envolvente - Media	15.260N	17.683 N	17.634 N

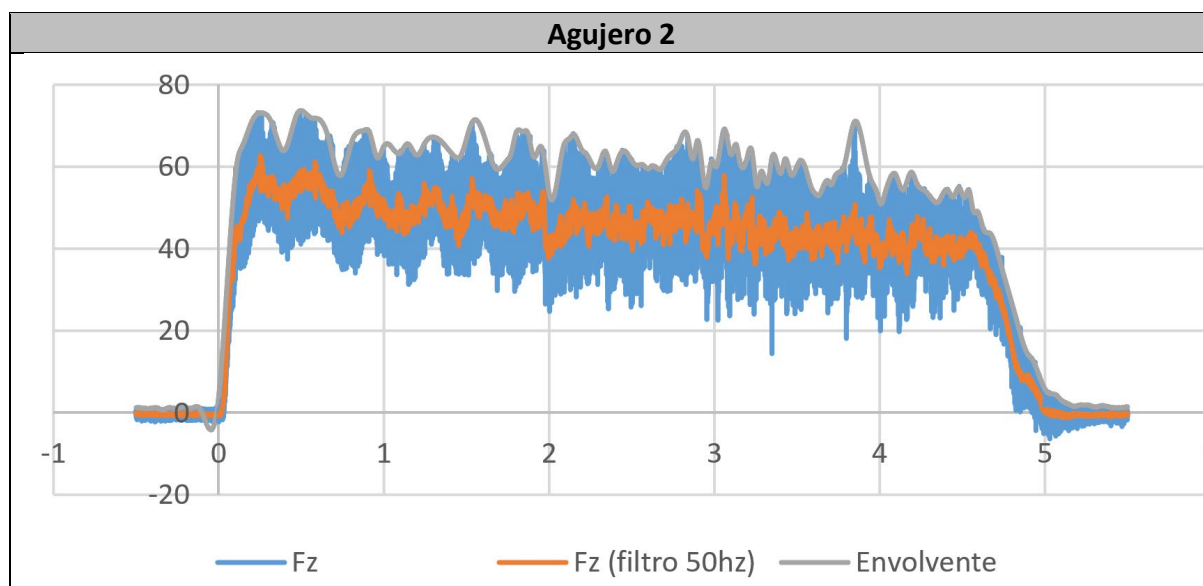
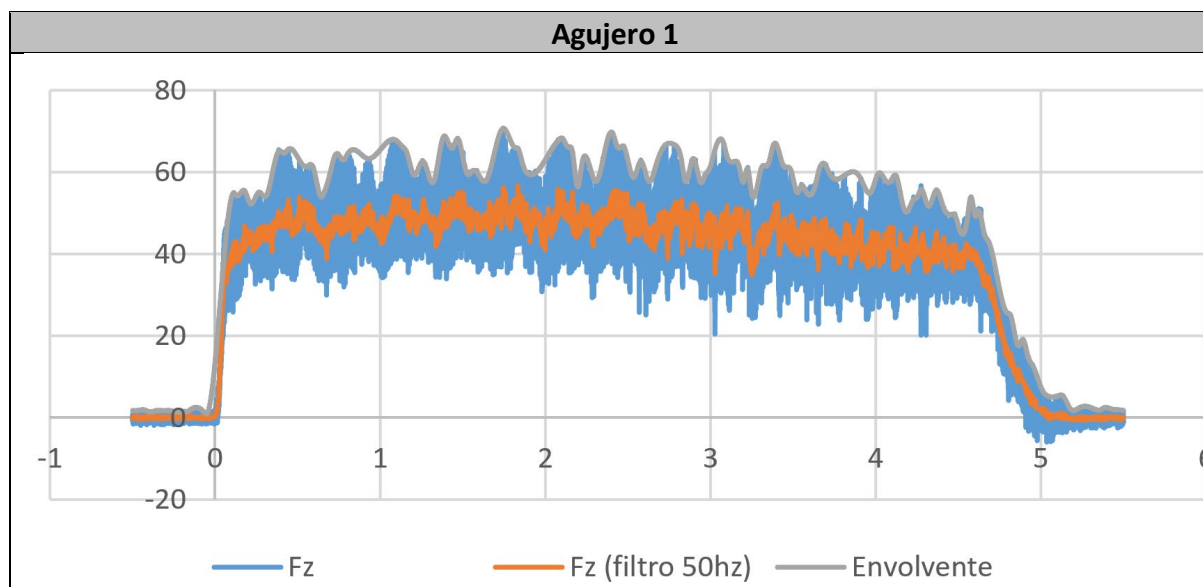


Agujero 3

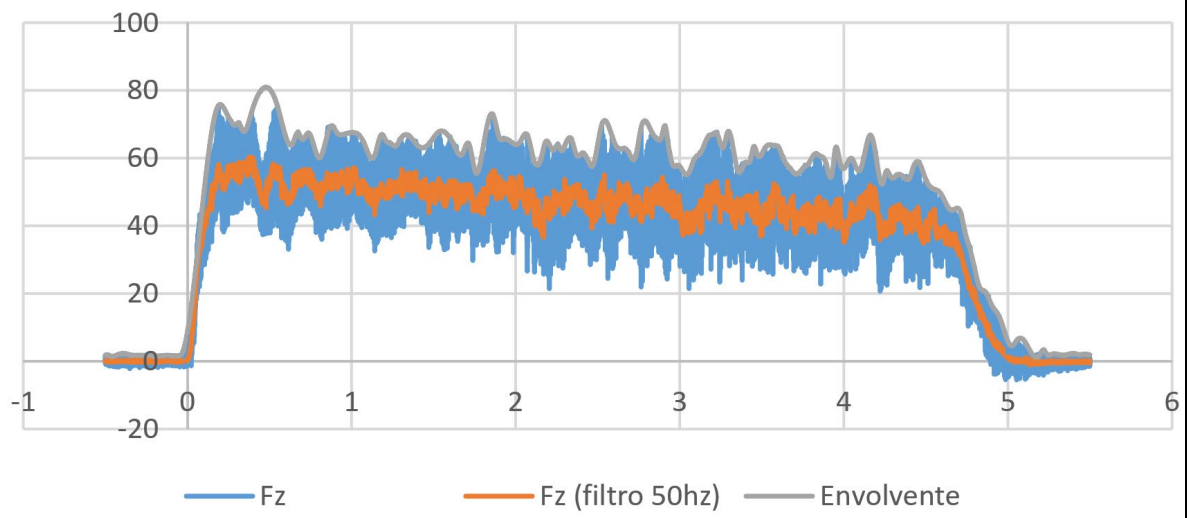


B.2.3. 3_HM_Ti_80_30_0.5_C

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	43.442 N	43.965 N	44.939 N
Media Envolvente	57.553 N	58.866 N	59.953 N
Valor Máximo	70.682 N	73.130 N	75.484 N
Diferencia Envolvente - Media	14.111 N	14.901 N	15.014 N

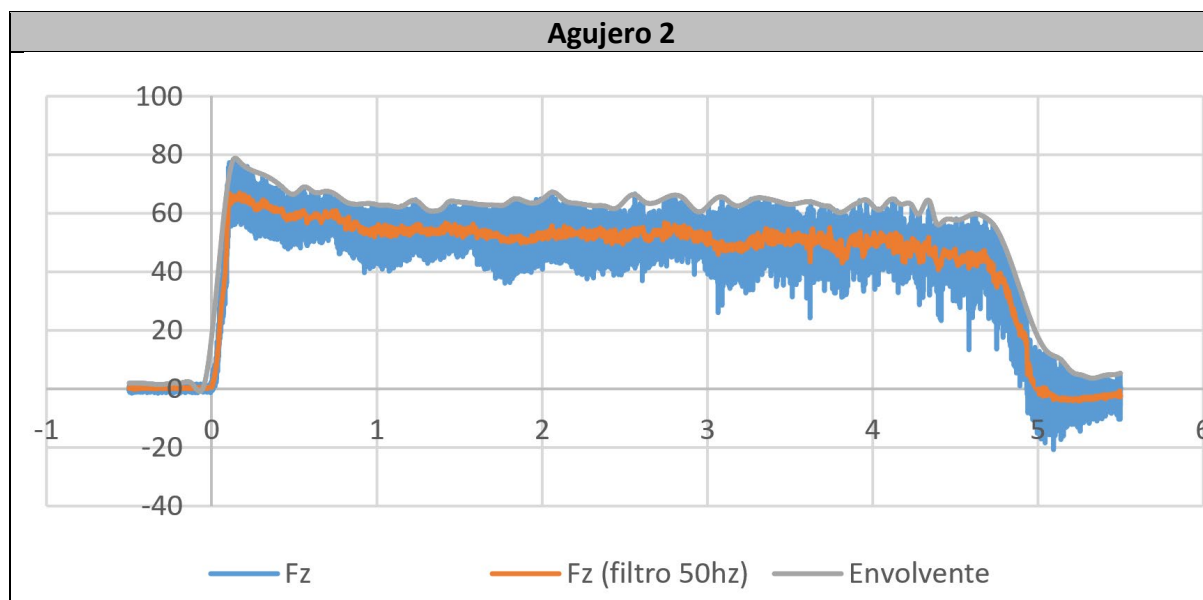
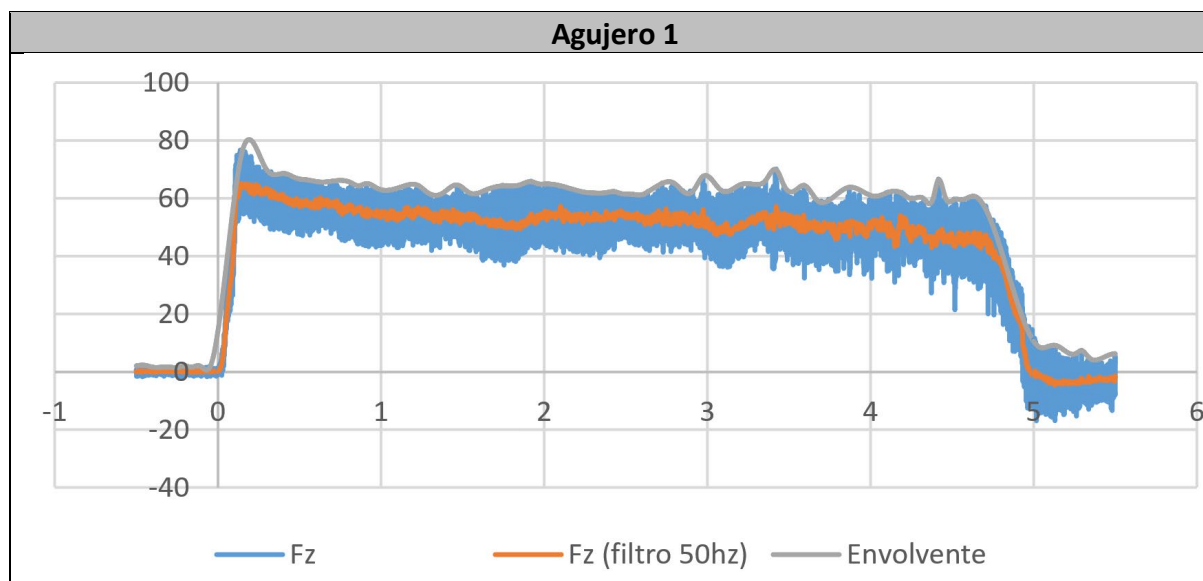


Agujero 3

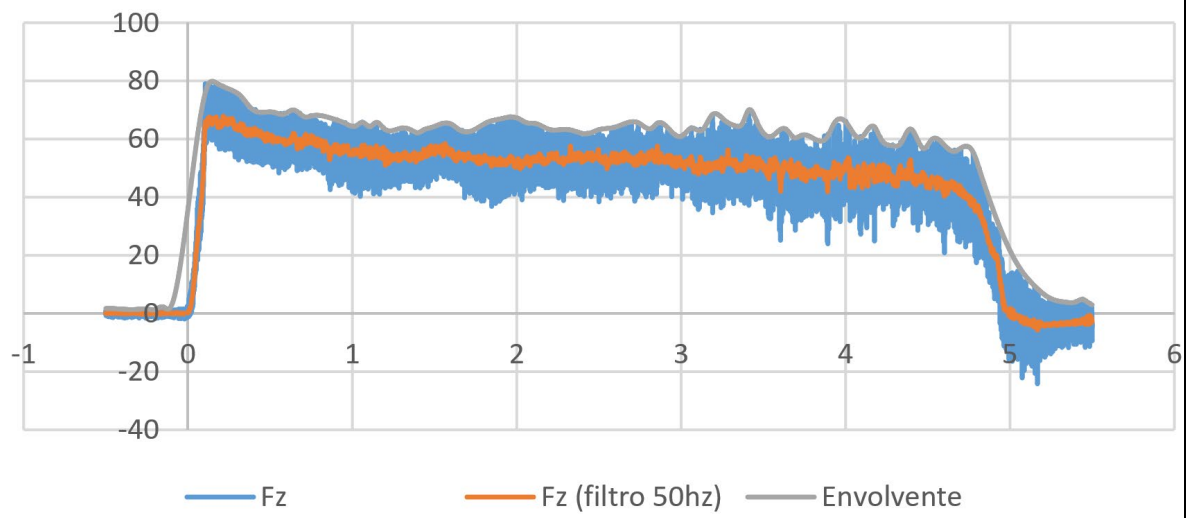


B.2.4. 5_HM_Ti_80_15_1_C

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	50.631 N	50.518 N	50.949 N
Media Envolvente	61.512 N	62.277 N	63.248 N
Valor Máximo	76.752 N	78.333 N	79.350 N
Diferencia Envolvente - Media	10.881 N	11.759 N	12.298 N

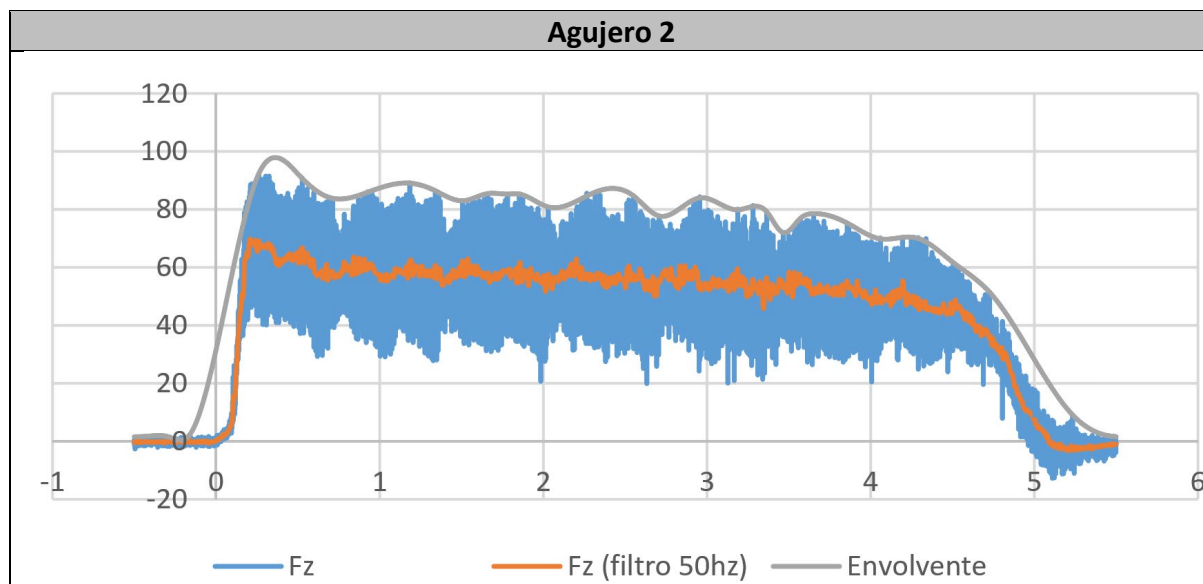
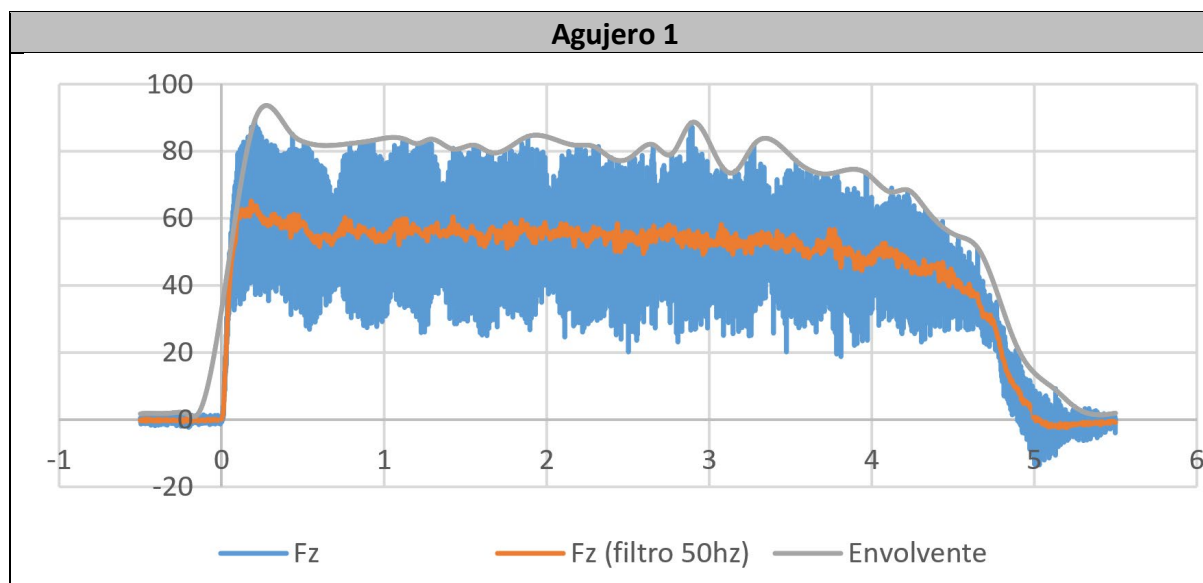


Agujero 3

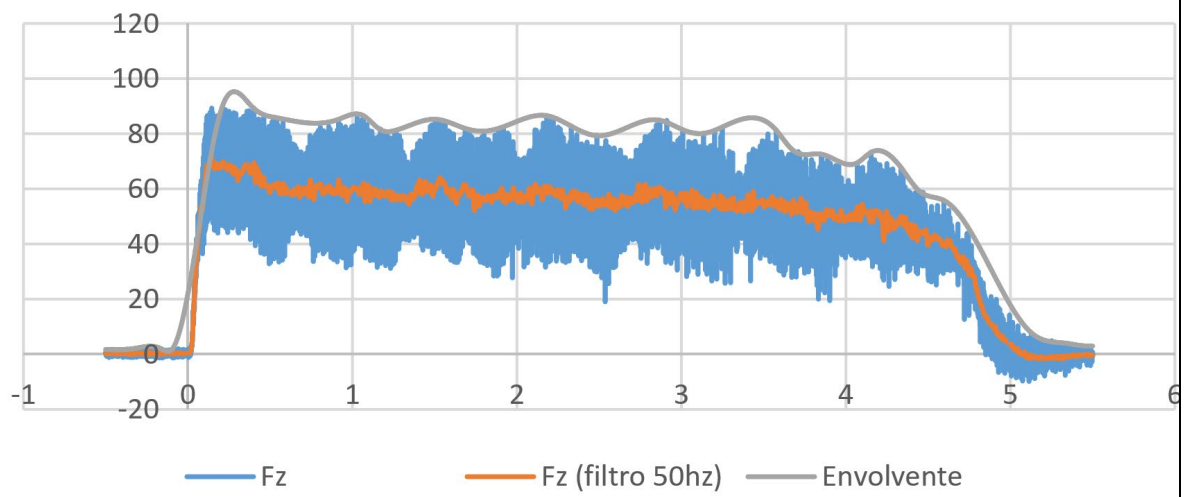


B.2.5. 8_HM_Ti_160_30_1_C

Fuerzas			
Datos	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3
Media	50.555 N	52.124 N	53.039 N
Media Envolvente	74.594 N	77.397 N	76.315 N
Valor Máximo	89.144 N	92.314 N	89.615 N
Diferencia Envolvente - Media	24.038 N	25.273 N	23.275 N



Agujero 3

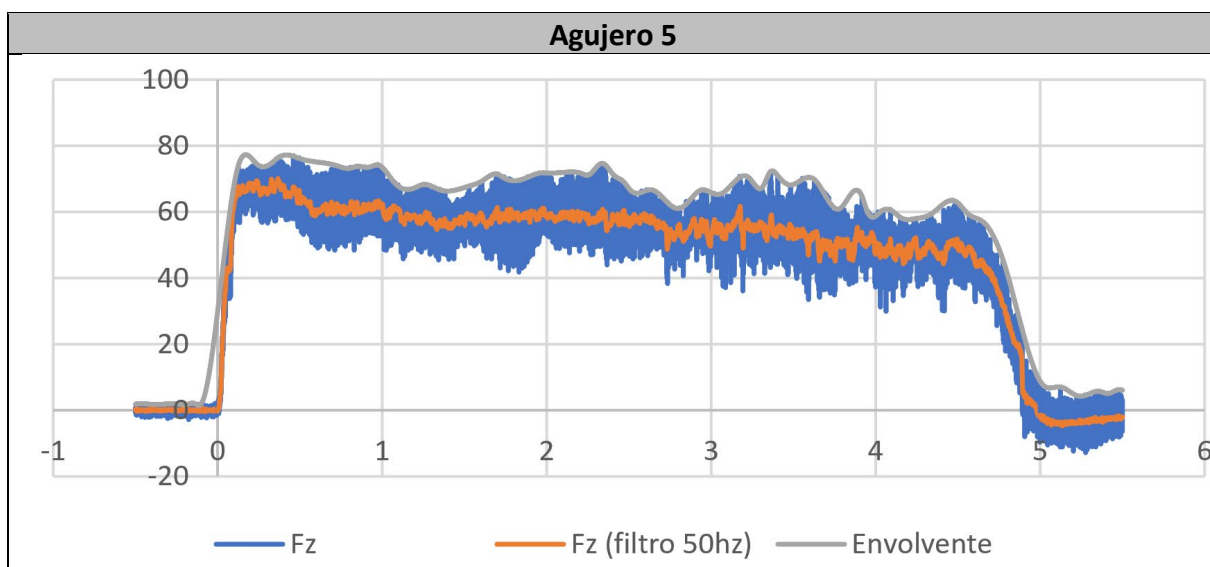


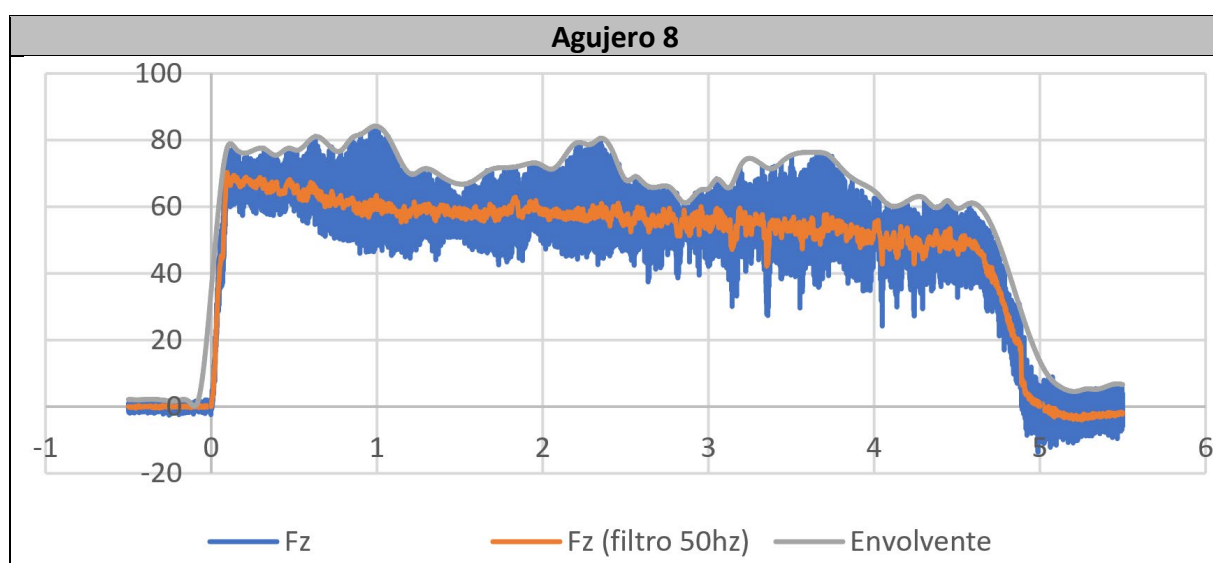
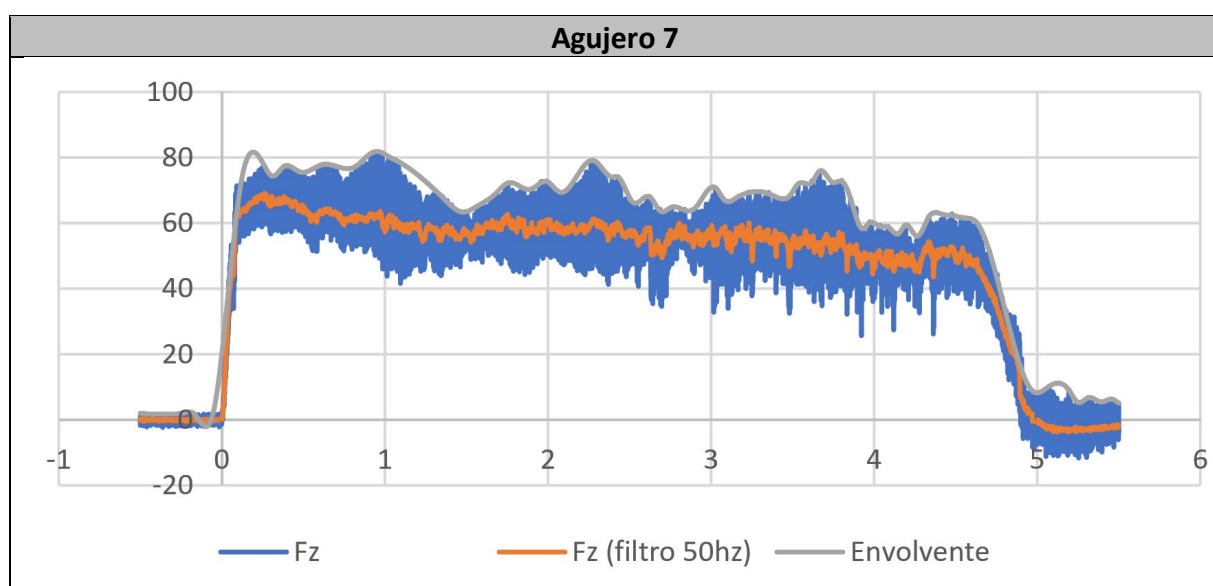
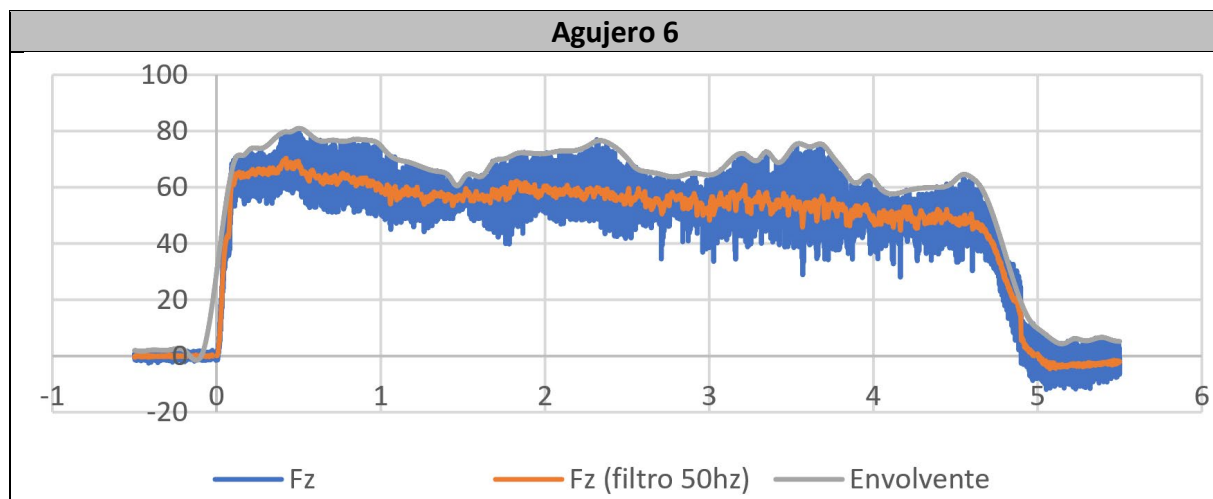
B.3. Ensayo Vida

B.3.1. 5_Vida_HM_Ti_80_15_1_C

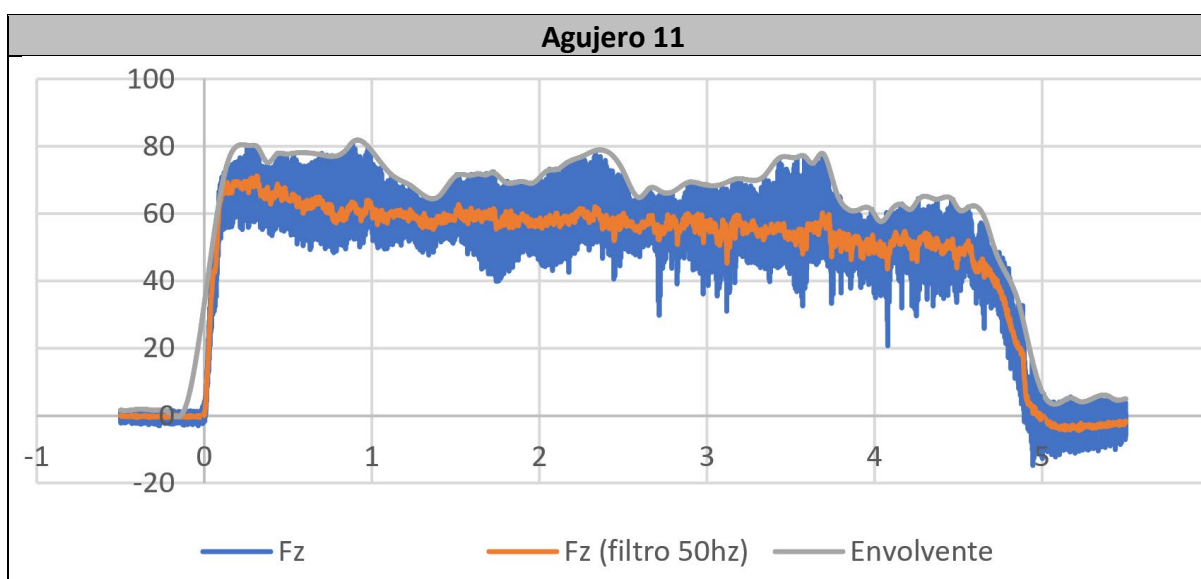
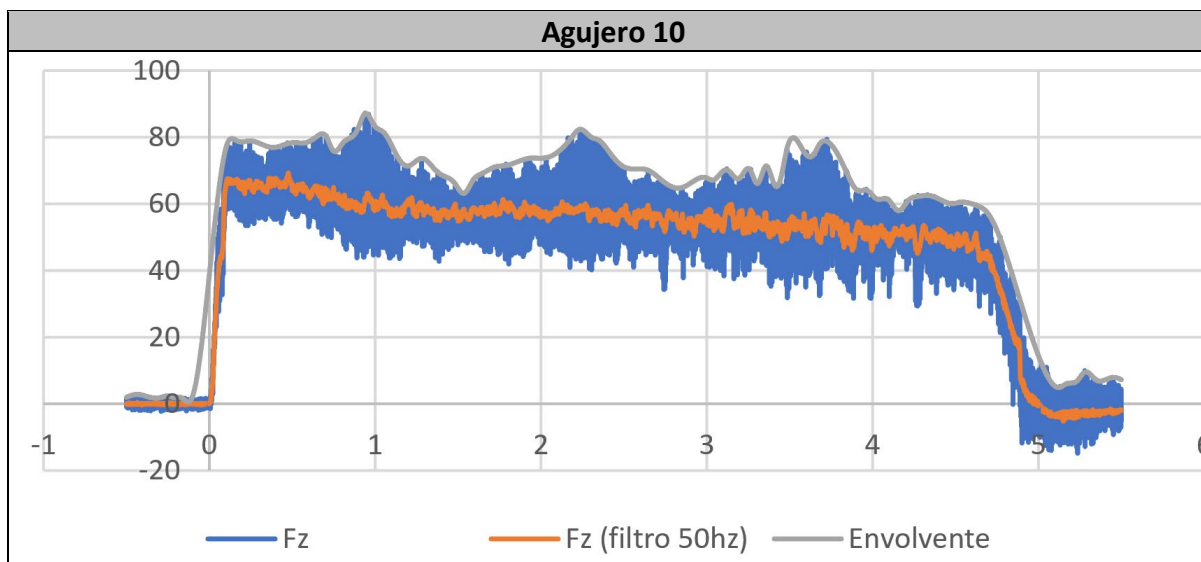
Fuerzas				
Agujero	Media	Media Envolvente	Valor Máximo	Diferencia Envolvente - Media
5	53.563 N	65.516 N	76.816 N	11.953 N
6	53.919 N	66.351 N	80.841 N	12.432 N
7	54.124 N	66.667 N	81.702 N	12.543 N
8	54.090 N	68.760 N	84.133 N	14.670 N
9	-	-	-	-
10	53.967 N	69.183 N	87.082 N	15.216 N
11	54.342 N	68.026 N	81.193 N	13.684 N
12	54.791 N	68.543 N	83.339 N	13.752 N
13	55.327 N	69.529 N	82.540 N	14.202 N
14	55.597 N	69.456 N	82.561 N	13.859 N
15	55.673 N	68.435 N	82.610 N	12.763 N
16	55.596 N	69.333 N	83.606 N	13.737 N
17	55.617 N	69.216 N	82.427 N	13.599 N
18	54.799 N	68.160 N	79.906 N	13.361 N
19	55.760 N	69.923 N	83.116 N	14.163 N
20	55.270 N	69.956 N	85.013 N	14.686 N
21	54.895 N	68.126 N	80.720 N	13.231 N
22	55.638 N	69.392 N	84.916 N	13.754 N
23	55.710 N	68.740 N	83.718 N	13.030 N
24	55.733 N	69.259 N	85.038 N	13.526 N
25	56.005 N	69.836 N	83.837 N	13.832 N
26	55.703 N	70.431 N	91.190 N	14.728 N
27	55.023 N	67.900 N	81.925 N	12.878 N
28	55.281 N	68.473 N	84.358 N	13.192 N
29	55.261 N	68.721 N	85.386 N	13.460 N
30	54.419 N	67.851 N	83.655 N	13.432 N
31	54.901 N	69.069 N	83.984 N	14.168 N
32	54.588 N	68.689 N	84.099 N	14.101 N
33	55.854 N	68.761 N	84.361 N	12.907 N
34	55.203 N	67.605 N	83.650 N	12.402 N
35	55.713 N	69.463 N	86.655 N	13.750 N
36	55.749 N	69.547 N	84.735 N	13.798 N
37	55.848 N	70.755 N	85.602 N	14.907 N
38	55.308 N	69.275 N	83.412 N	13.967 N
39	55.158 N	68.497 N	80.534 N	13.338 N
40	55.511N	69.235 N	82.475 N	13.725 N
41	55.938 N	70.542 N	85.276 N	14.604 N
42	55.508 N	70.998 N	86.728 N	15.491 N
43	55.242 N	70.379 N	85.234 N	15.138 N
44	55.740 N	71.774 N	86.645 N	16.034 N

45	56.241 N	70.650 N	85.006 N	14.409 N
46	55.332 N	68.740 N	84.324 N	13.408 N
47	56.100 N	70.371 N	86.221 N	14.272 N
48	55.480 N	70.223 N	87.029 N	14.742 N
49	56.023 N	71.282 N	87.186 N	15.259 N
50	58.620 N	72.347 N	82.944 N	13.727 N
51	59.912 N	74.068 N	82.573 N	14.156 N
52	60.056 N	73.064 N	84.752 N	13.008 N
53	59.592 N	74.349 N	84.727 N	14.757 N
54	59.873 N	74.914 N	86.005 N	15.041 N
55	59.247 N	74.190 N	84.660 N	14.944 N
56	59.256 N	73.133 N	84.074 N	13.877 N
57	59.150 N	73.002 N	83.742 N	13.852 N
58	59.629 N	73.312 N	84.979 N	13.683 N
59	60.251 N	75.526 N	87.128 N	15.275 N
60	59.407 N	73.600 N	85.217 N	14.193 N
61	60.084 N	76.013 N	90.876 N	15.929 N
62	59.751 N	73.807 N	83.578 N	14.056 N
63	59.465 N	74.530 N	86.467 N	15.065 N
64	60.208 N	75.175 N	86.482 N	14.967 N
65	59.165 N	74.429 N	86.090 N	15.263 N
66	59.093 N	74.409 N	85.979 N	15.316 N
67	58.776 N	73.434 N	88.295 N	14.658 N
68	59.408 N	73.047 N	86.624 N	13.639 N
69	59.575 N	73.950 N	84.952 N	14.375 N
70	59.622 N	74.361 N	86.440 N	14.739 N
71	58.746 N	73.905 N	86.250 N	15.159 N
72	59.931 N	75.554 N	88.839 N	15.624 N

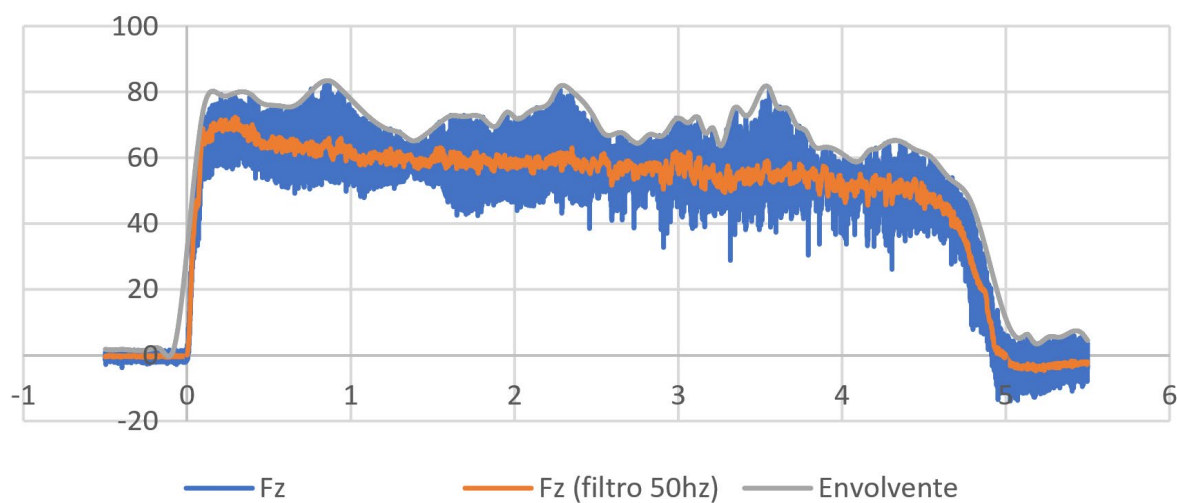




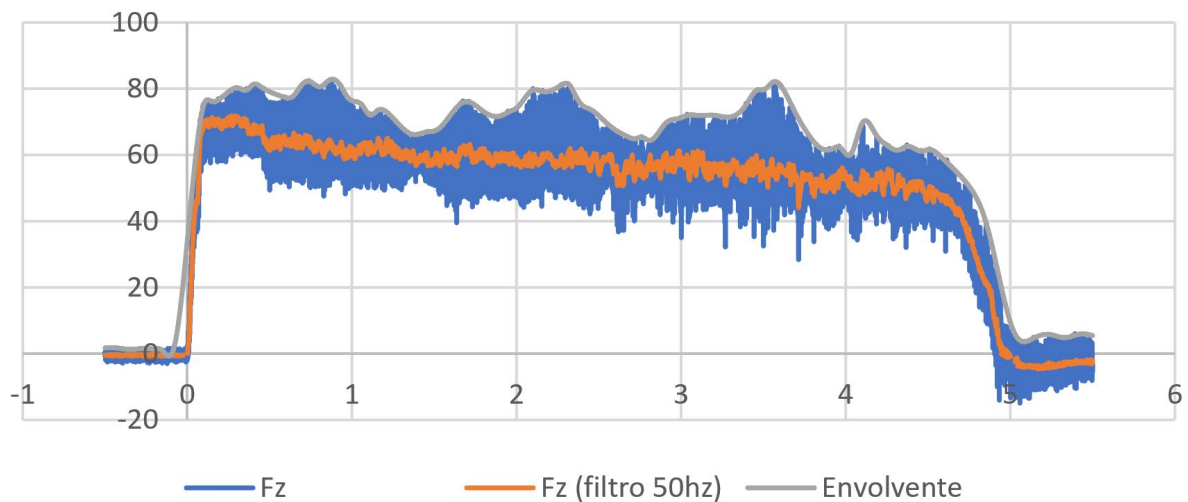
Agujero 9		
Media Filtro 50 Hz	Media Envolvente	Valor Máximo
Error en la obtención de los resultados		



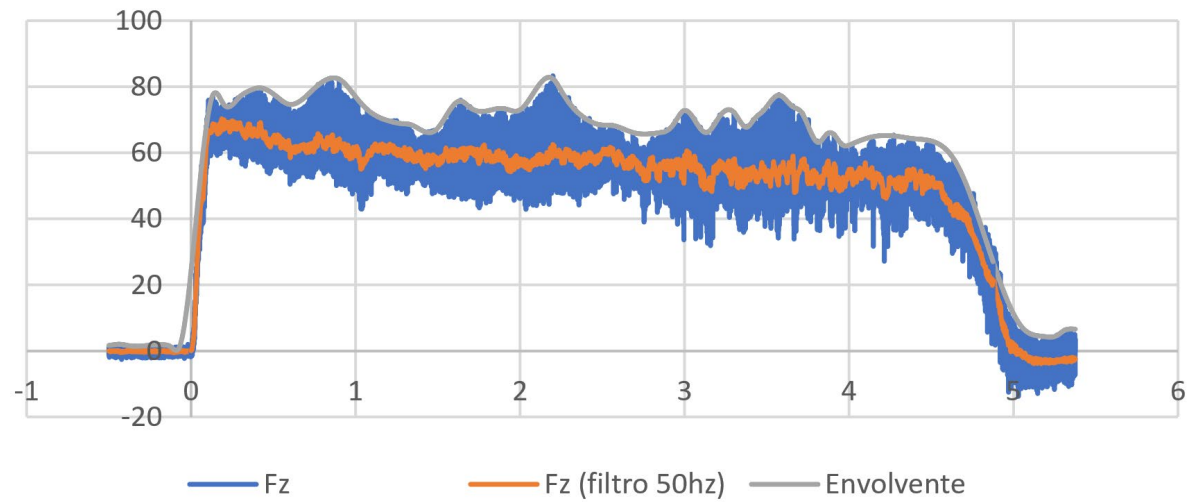
Agujero 12



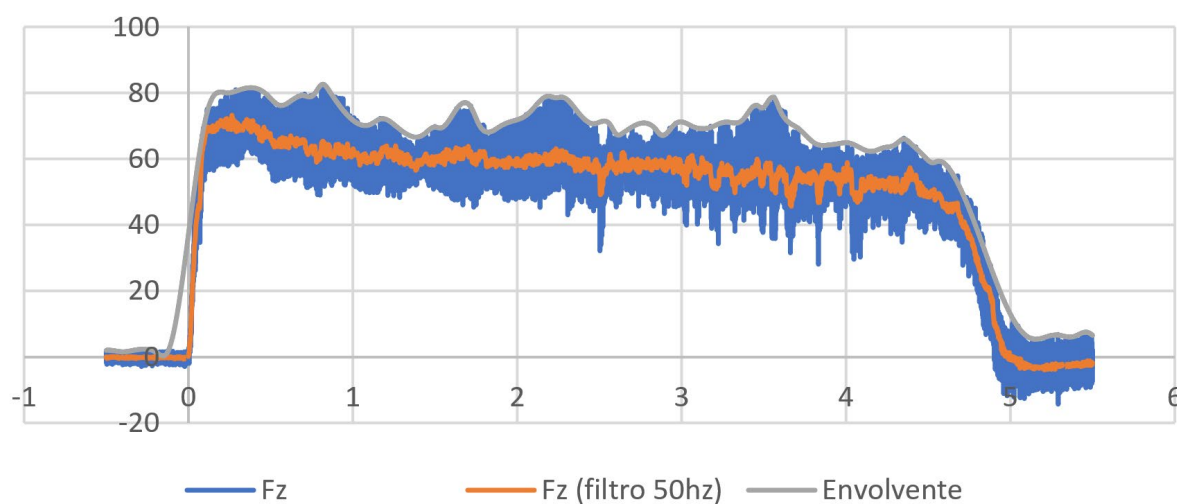
Agujero 13



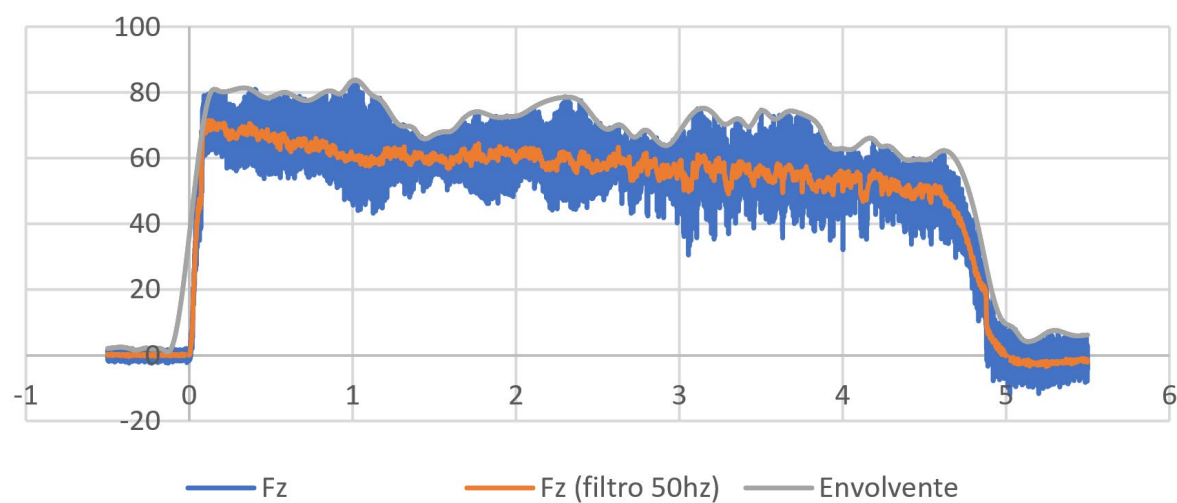
Agujero 14



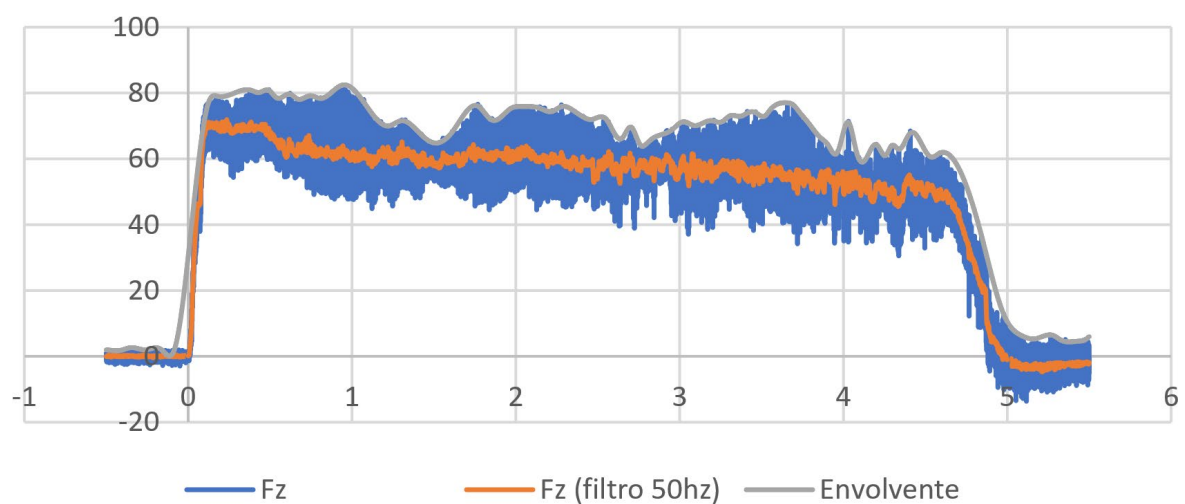
Agujero 15



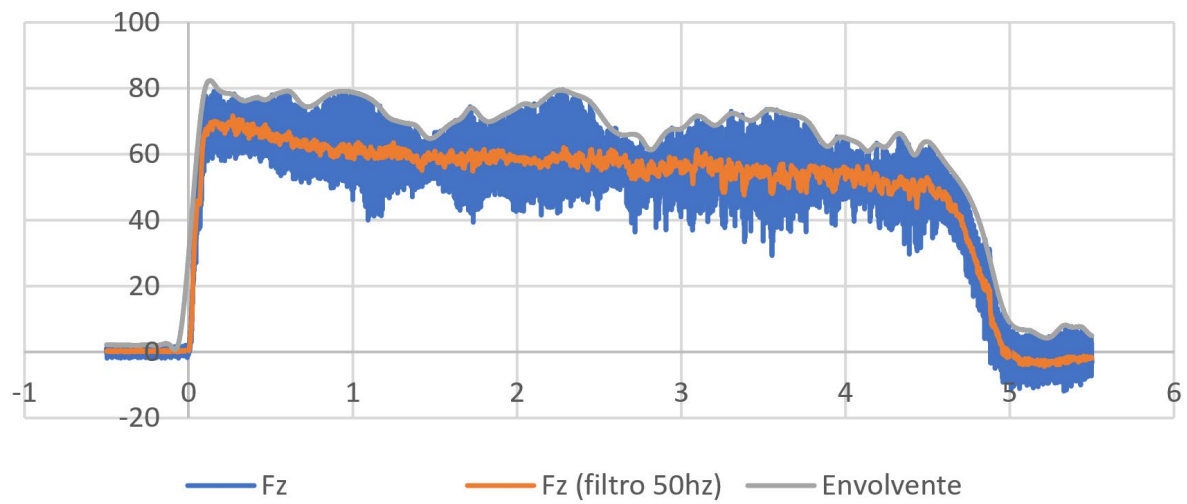
Agujero 16



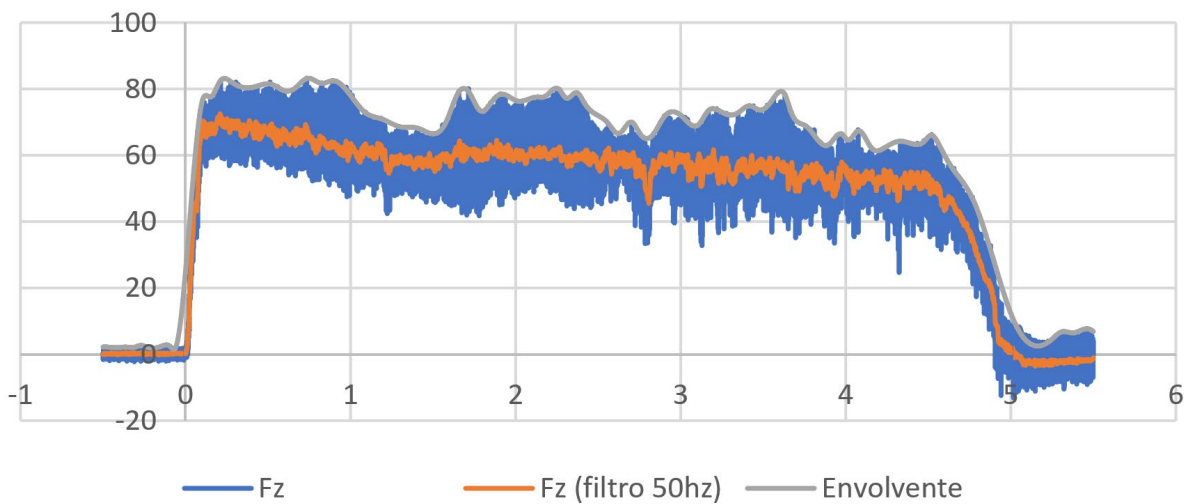
Agujero 17



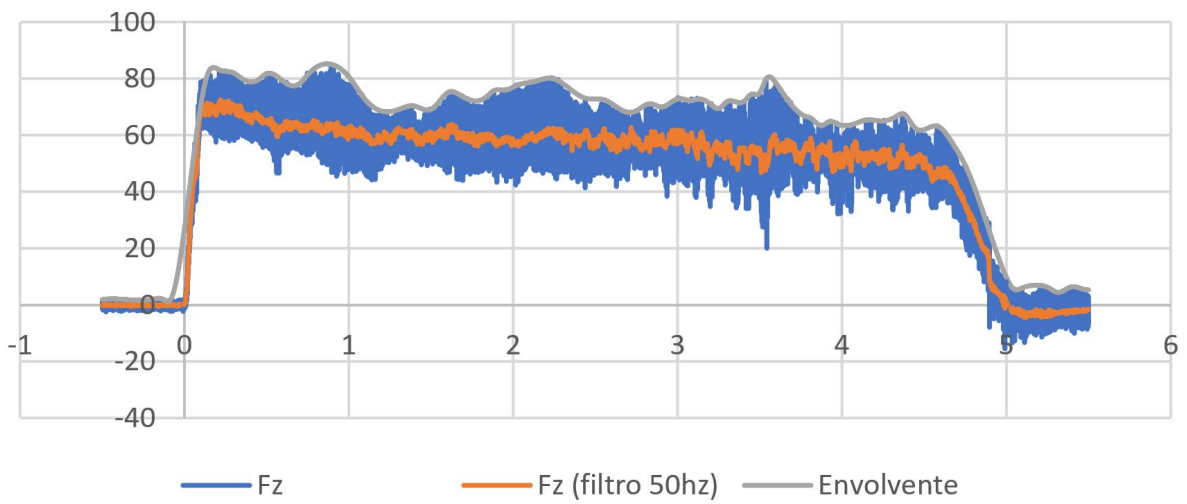
Agujero 18

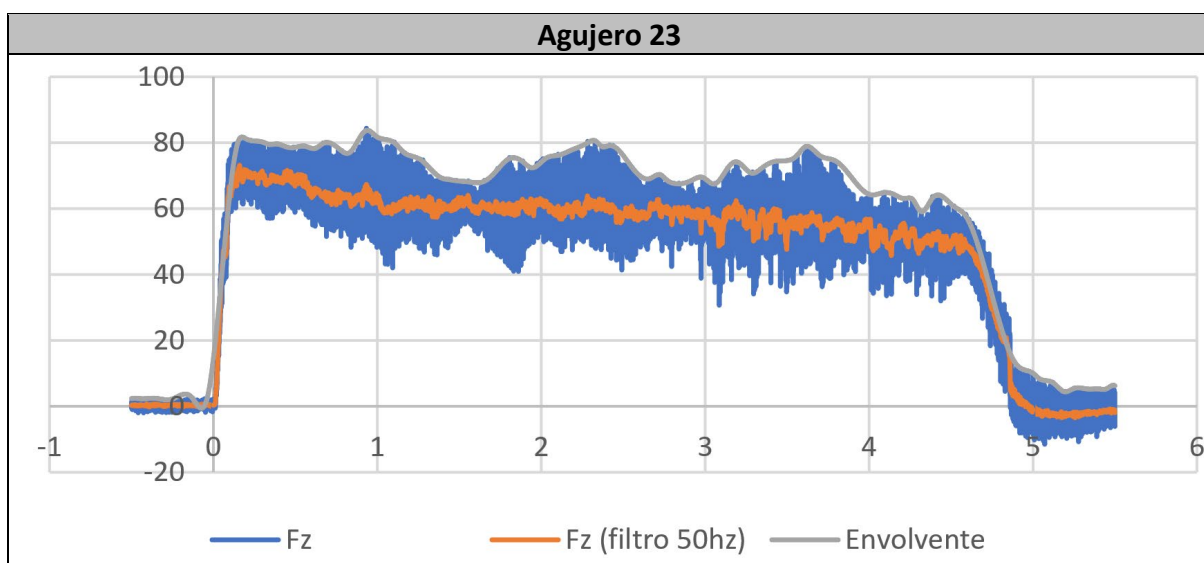
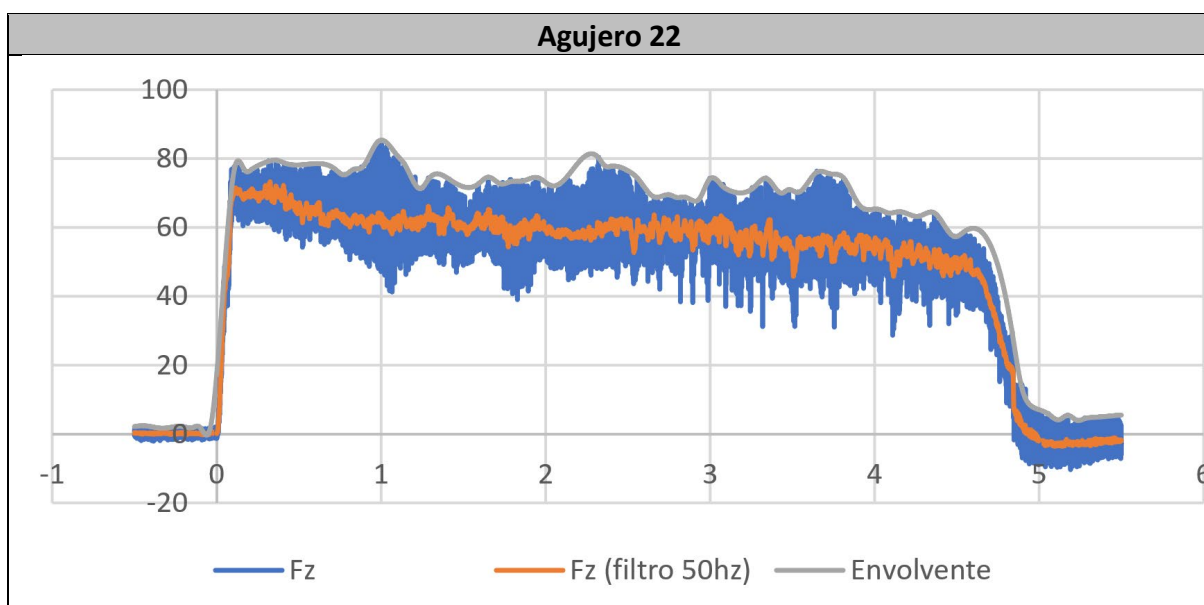
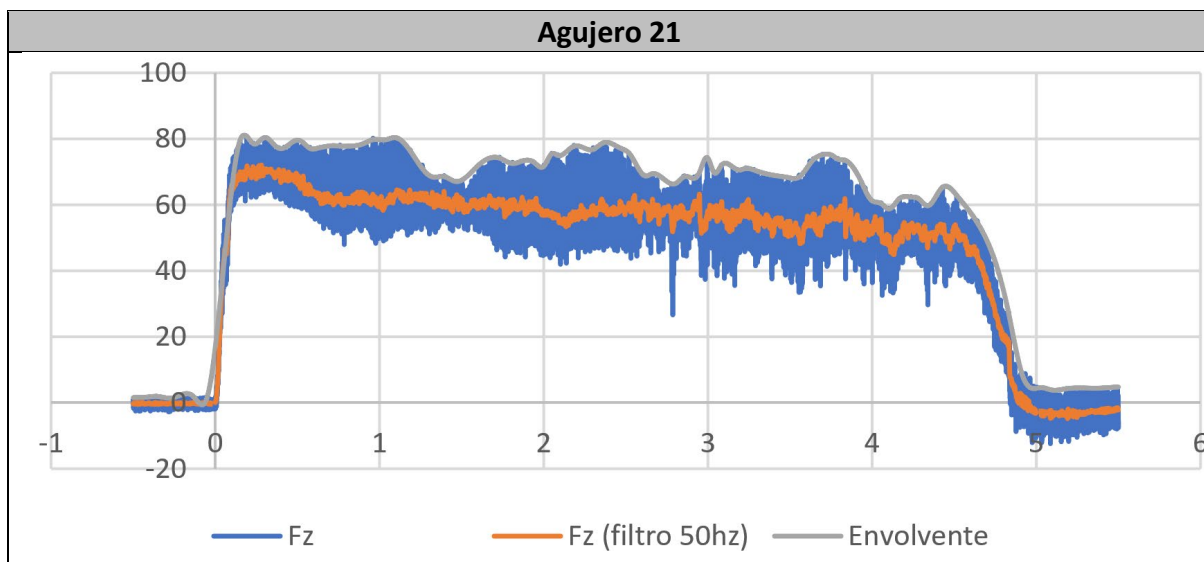


Agujero 19

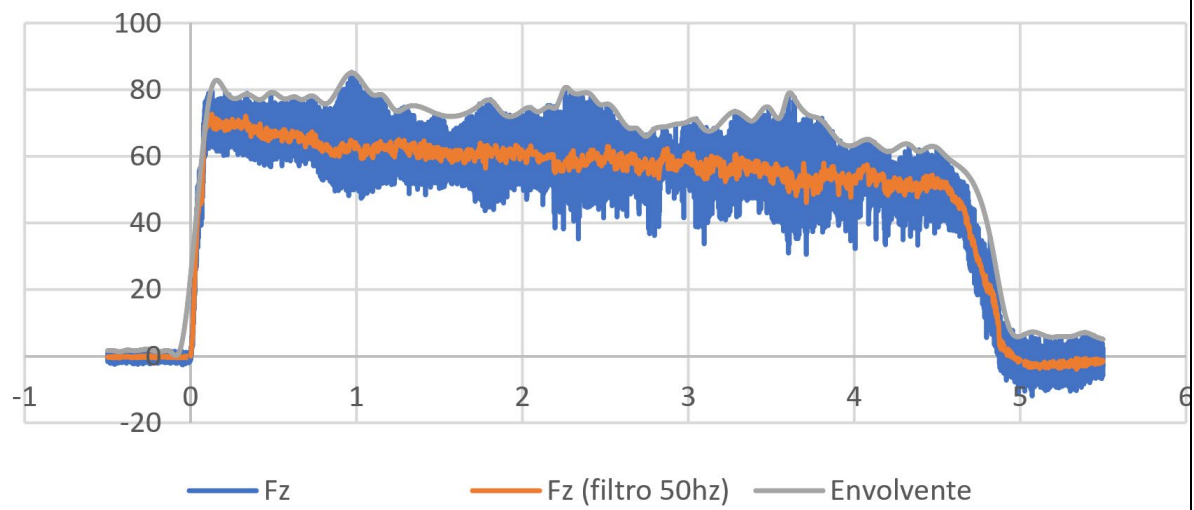


Agujero 20

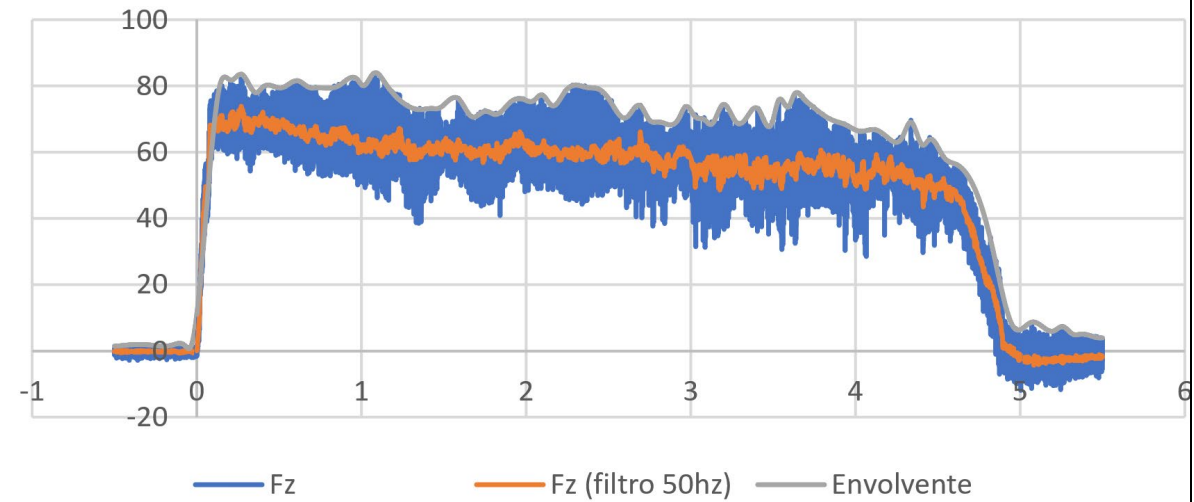




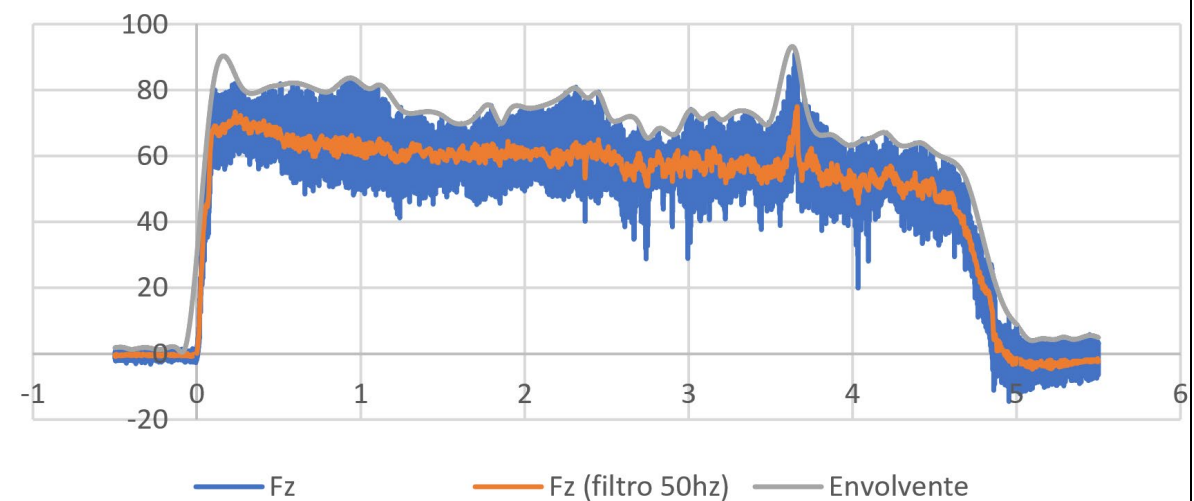
Agujero 24



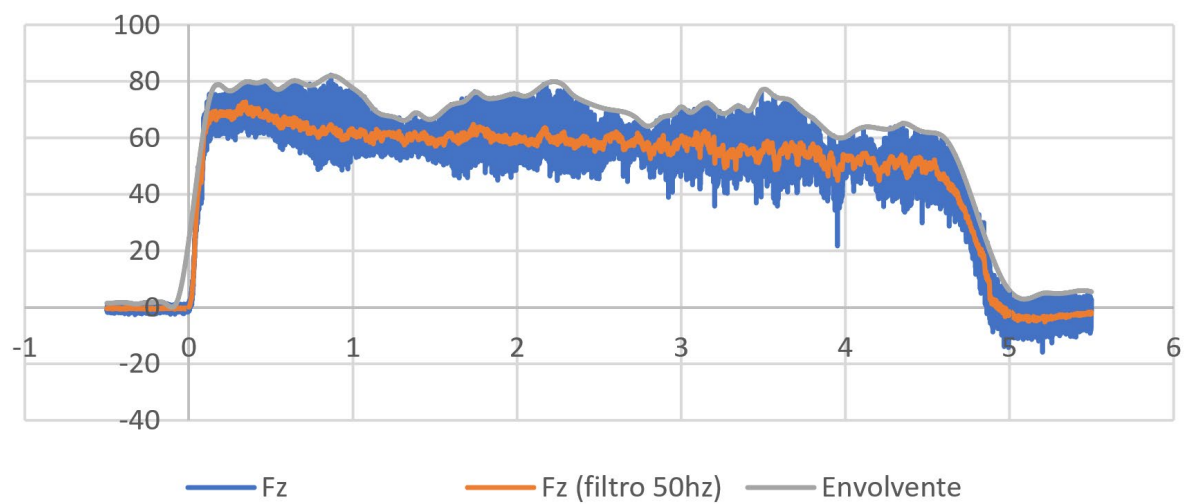
Agujero 25



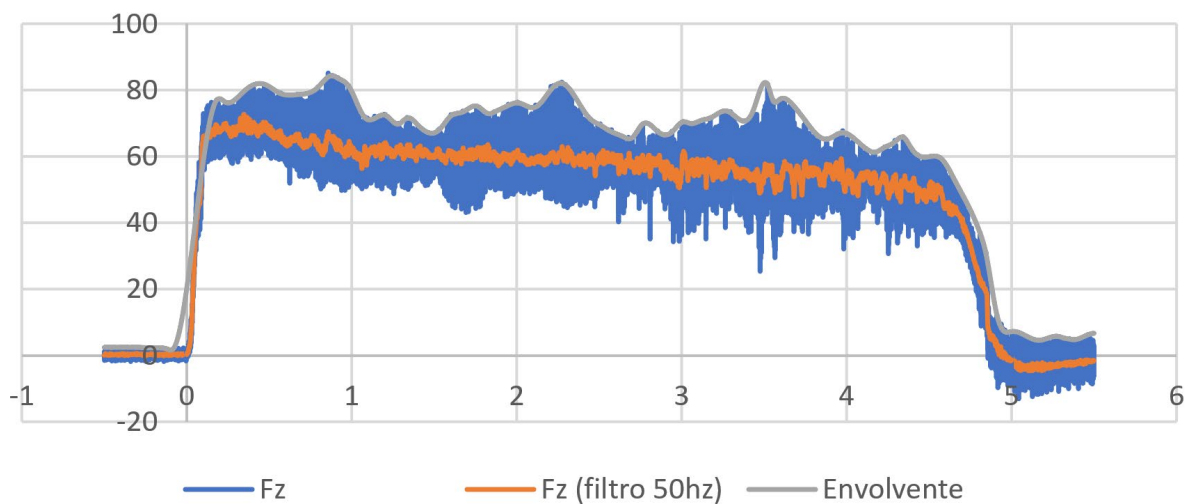
Agujero 26



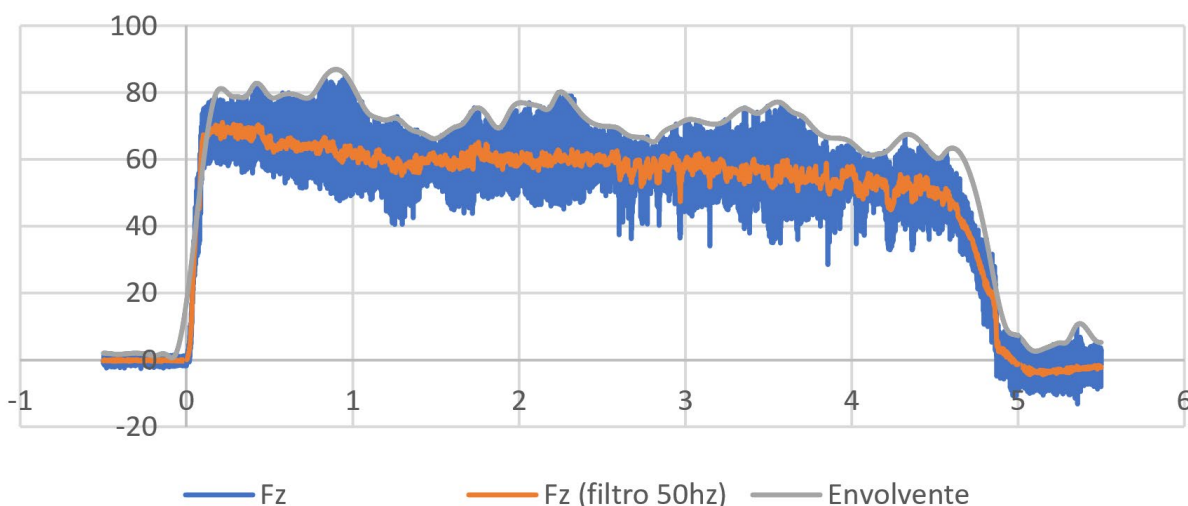
Agujero 27



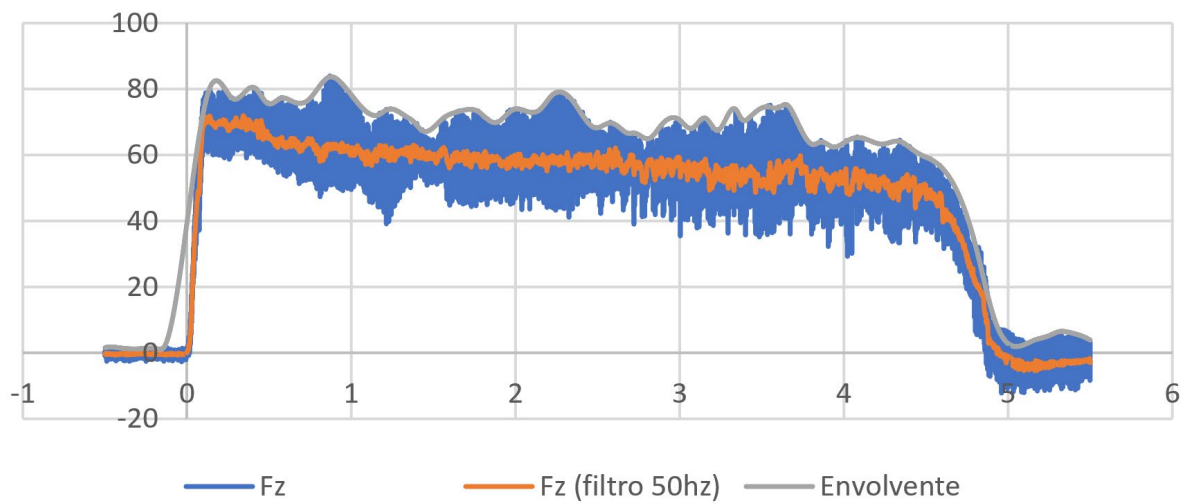
Agujero 28



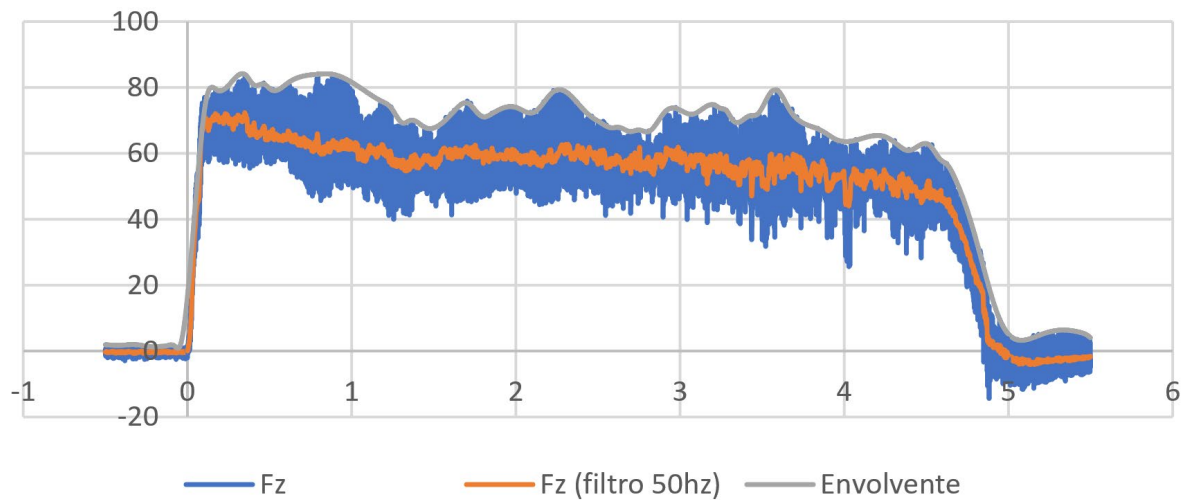
Agujero 29



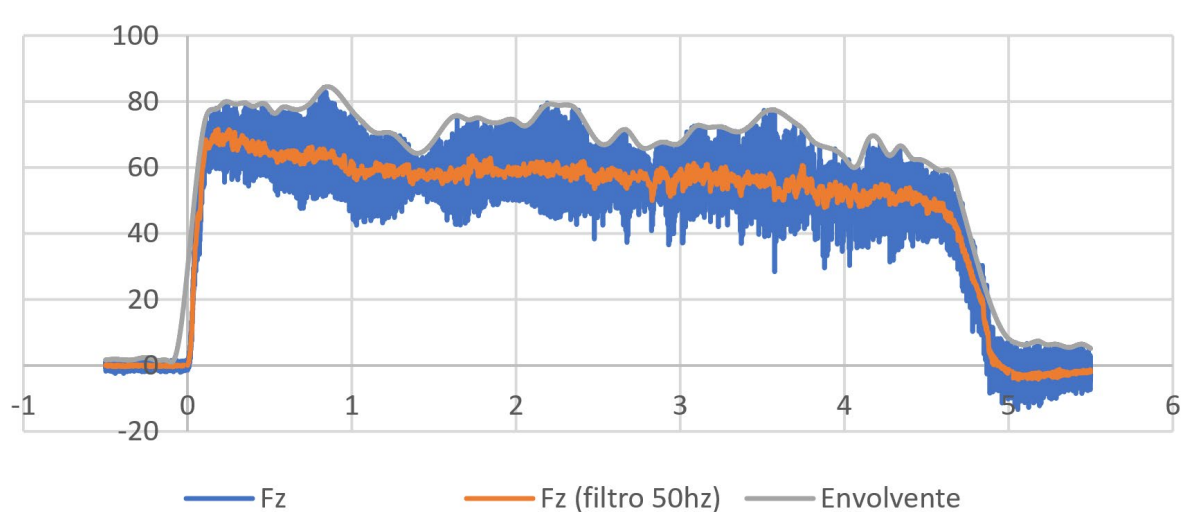
Agujero 30



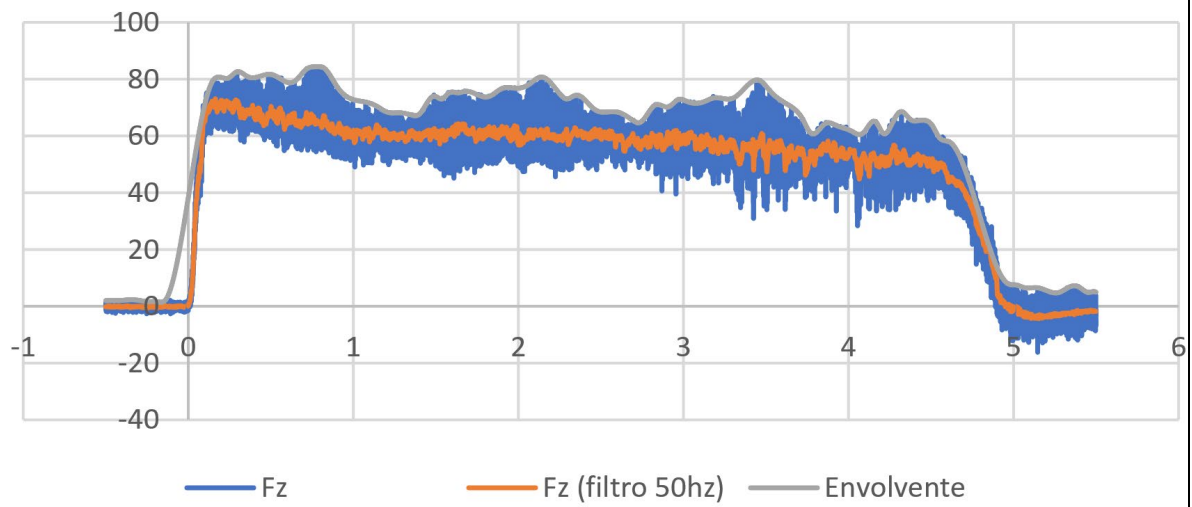
Agujero 31



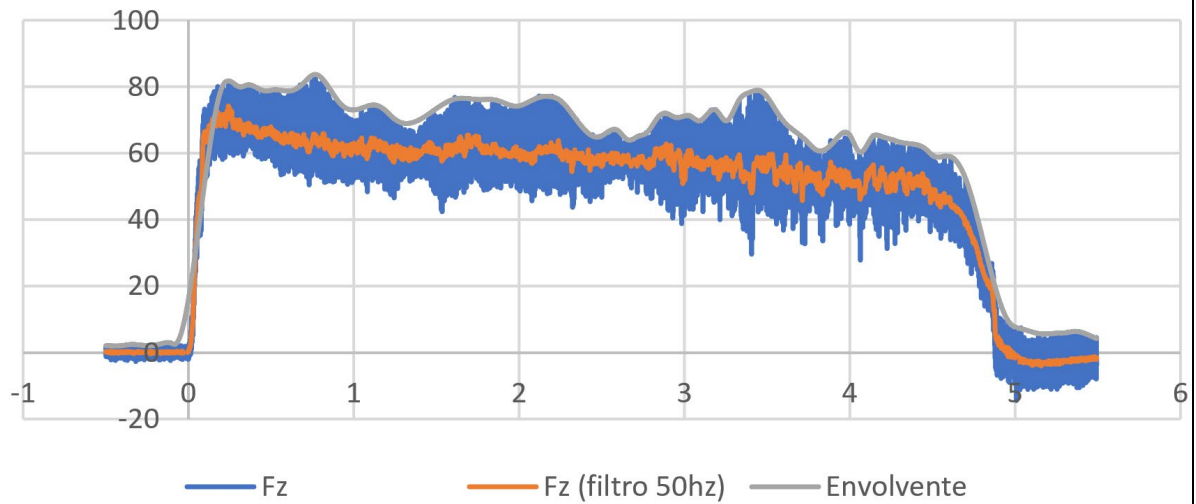
Agujero 32



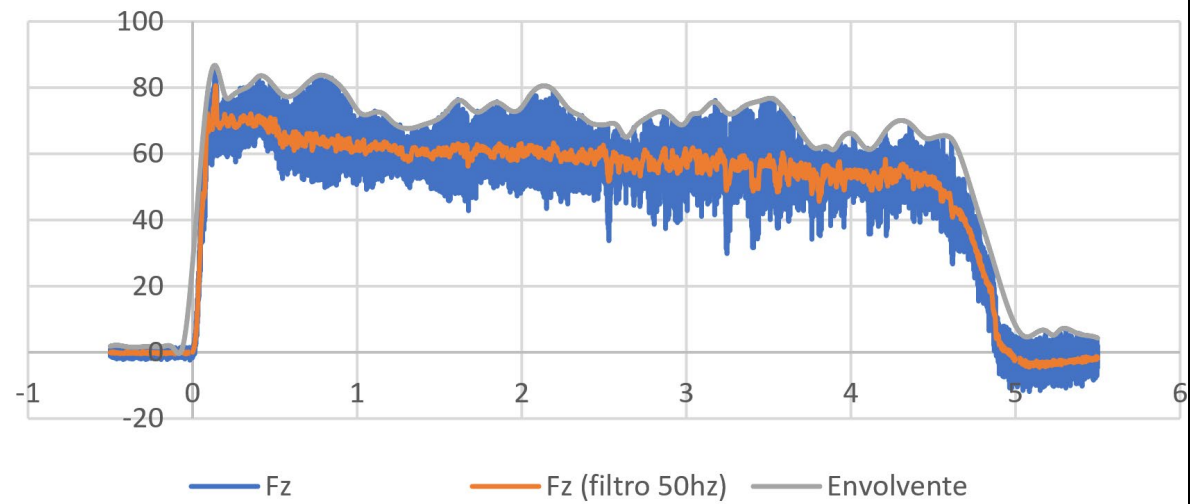
Agujero 33



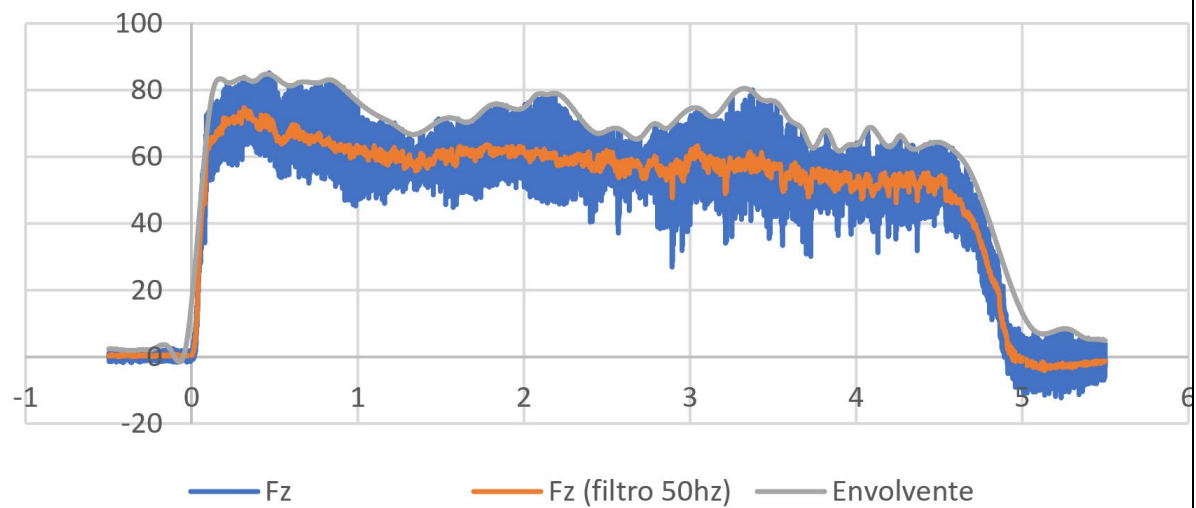
Agujero 34



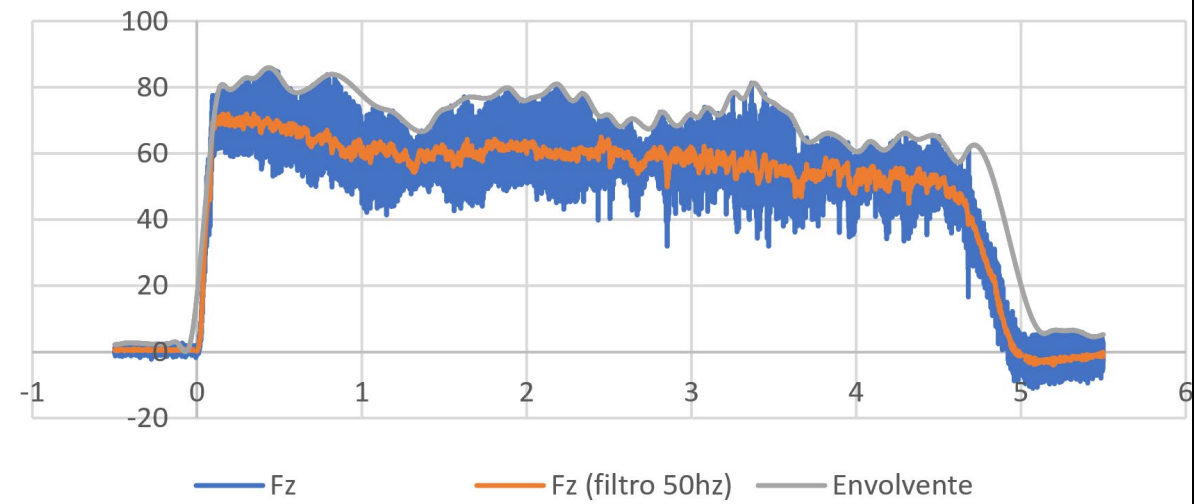
Agujero 35



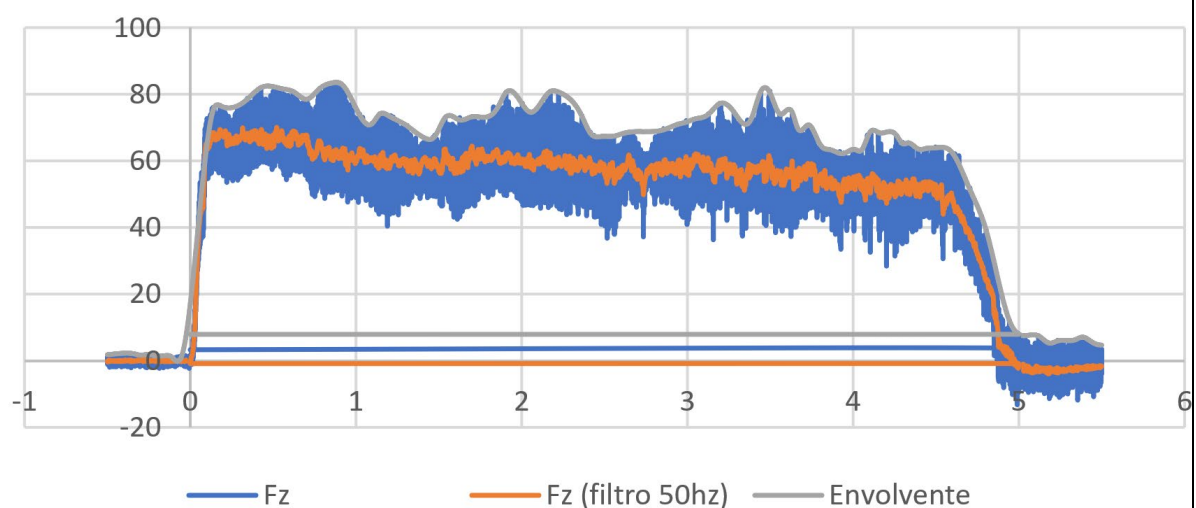
Agujero 36

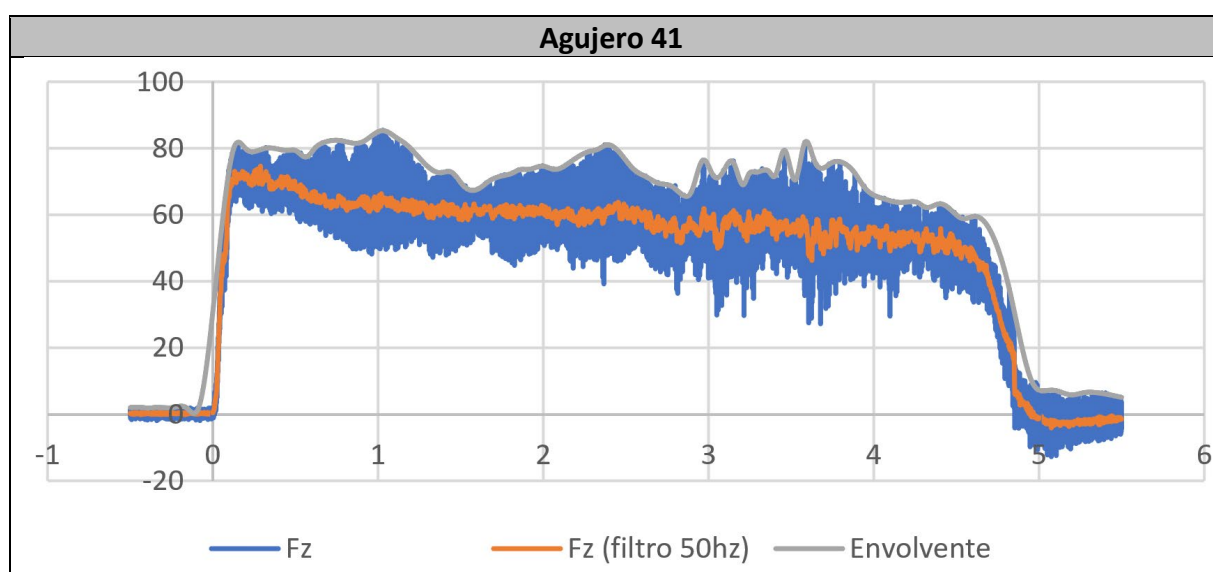
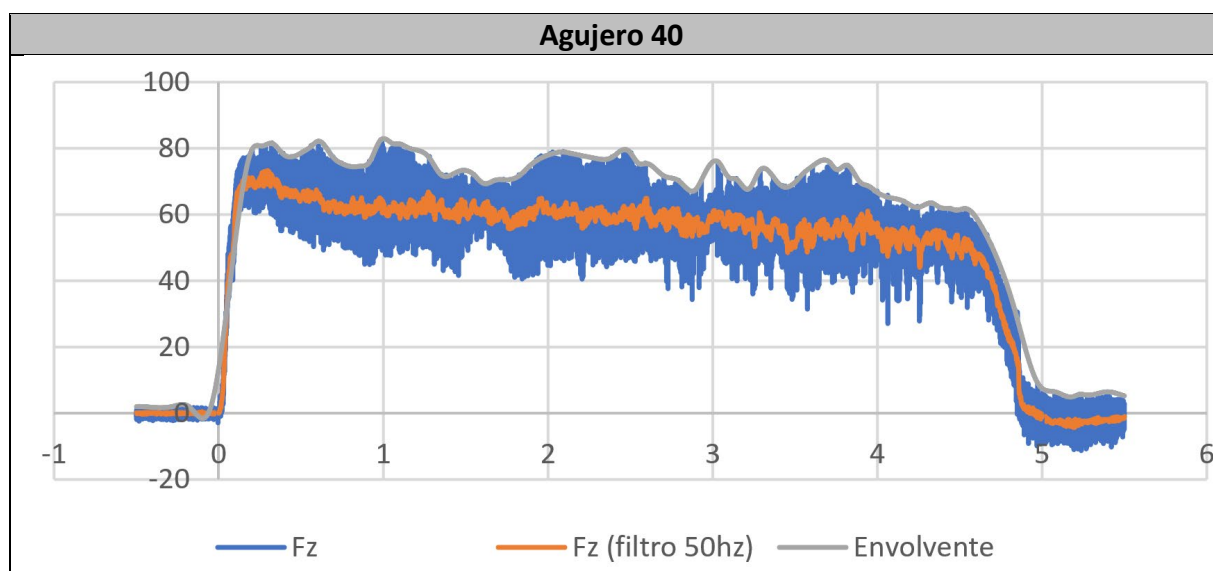
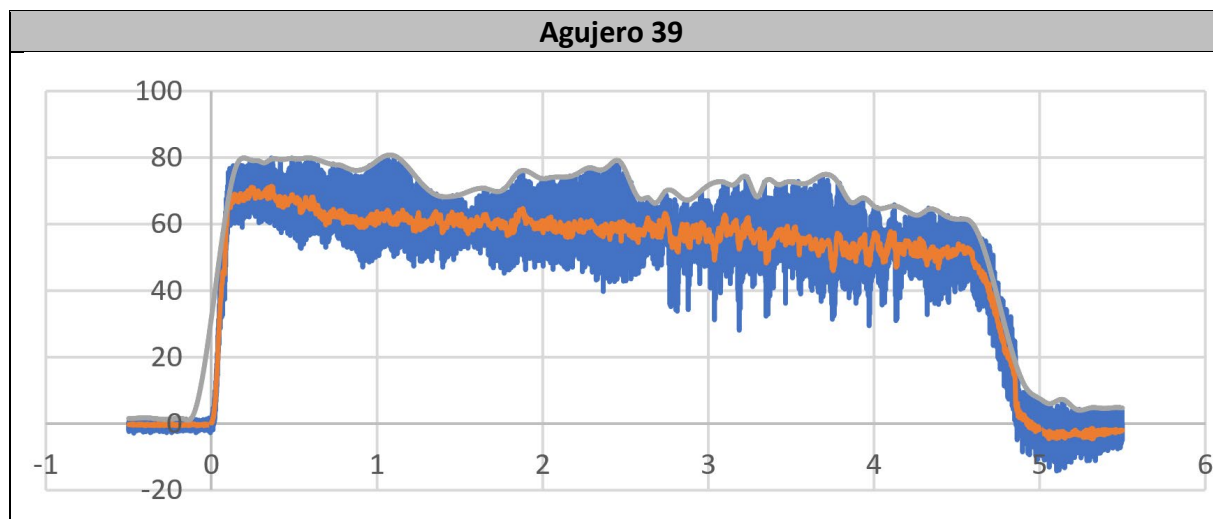


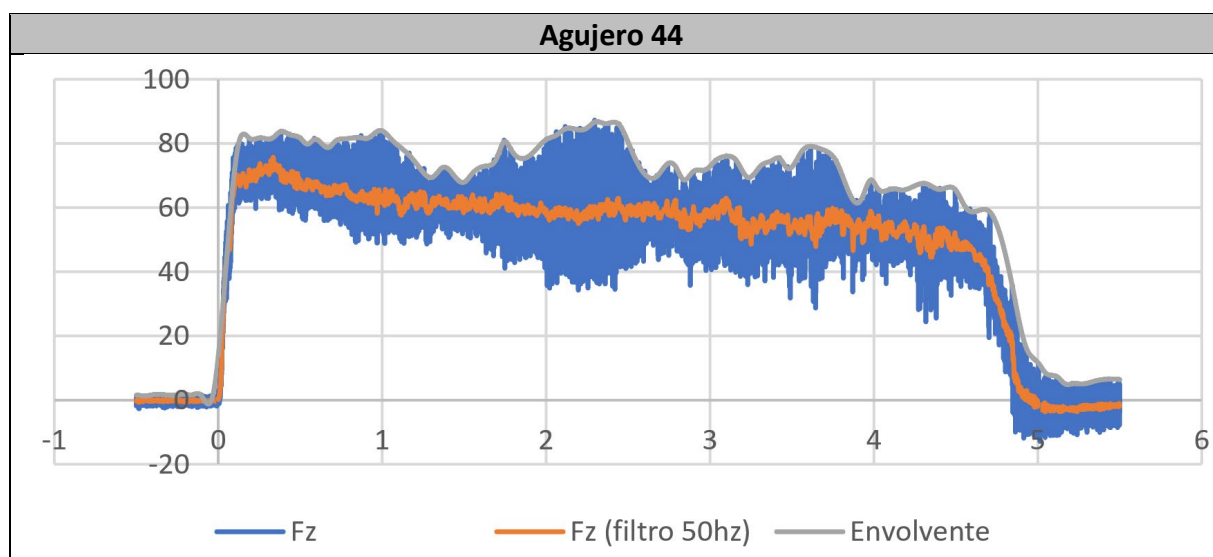
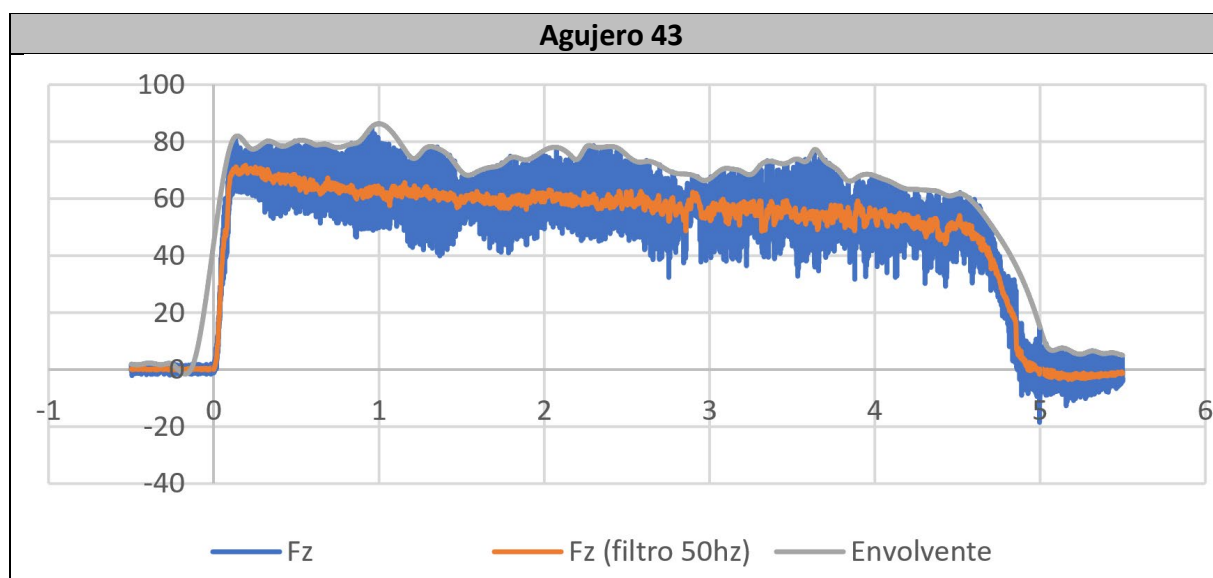
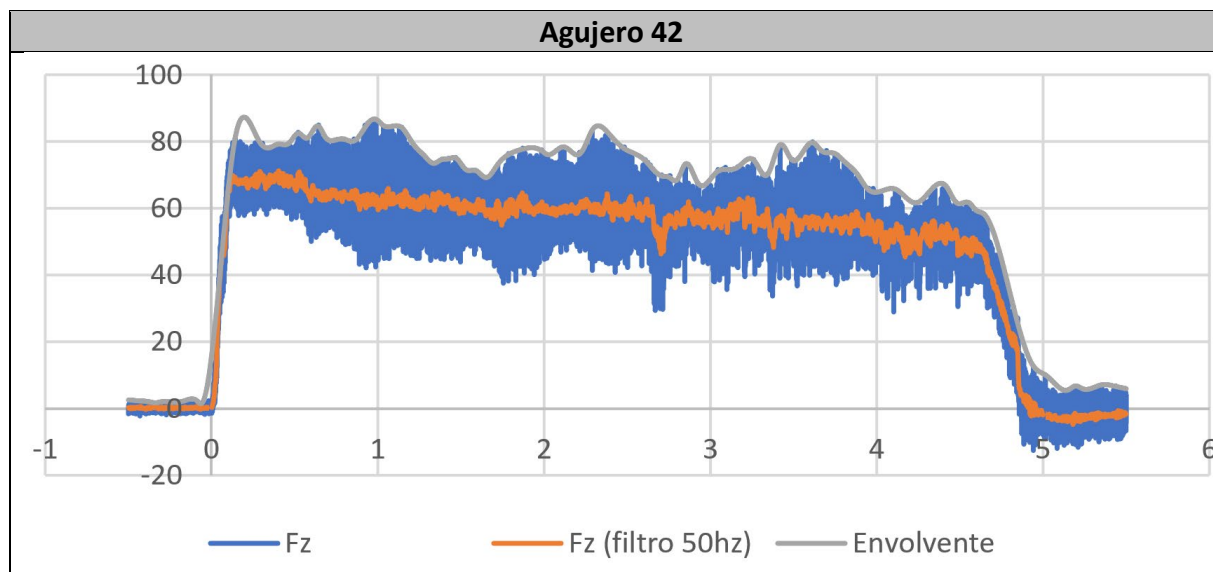
Agujero 37



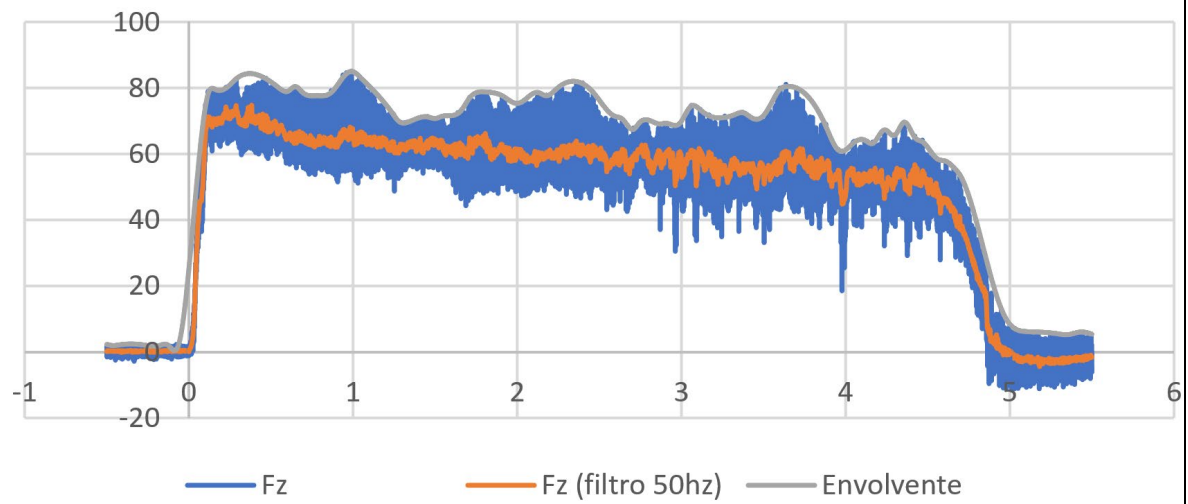
Agujero 38



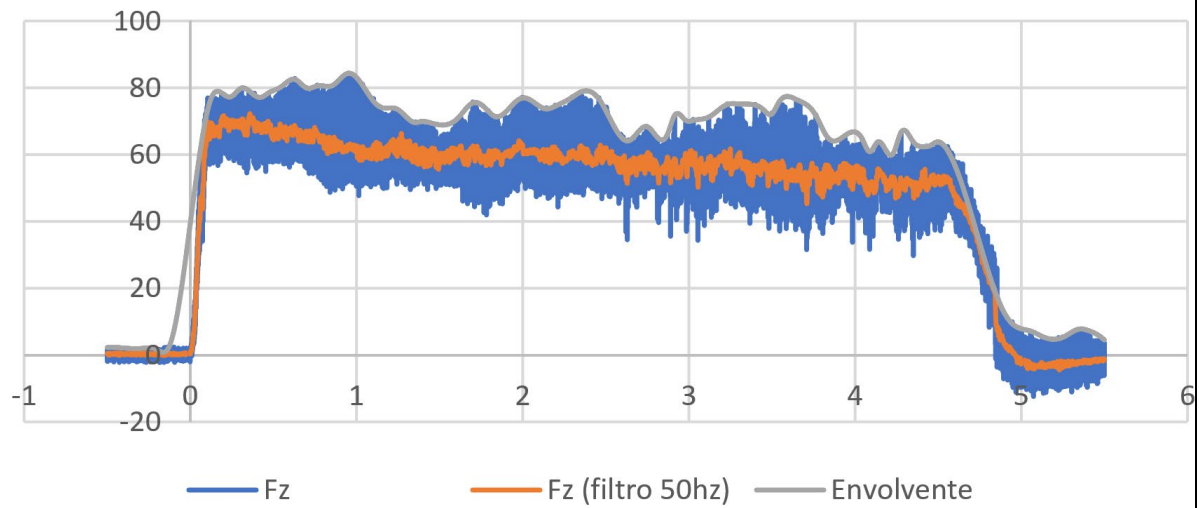




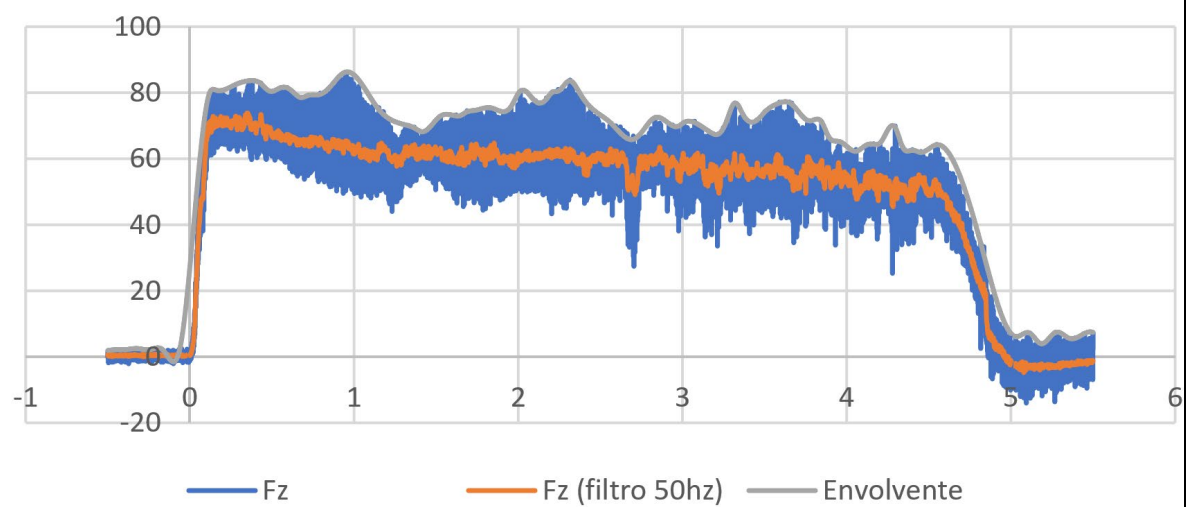
Agujero 45

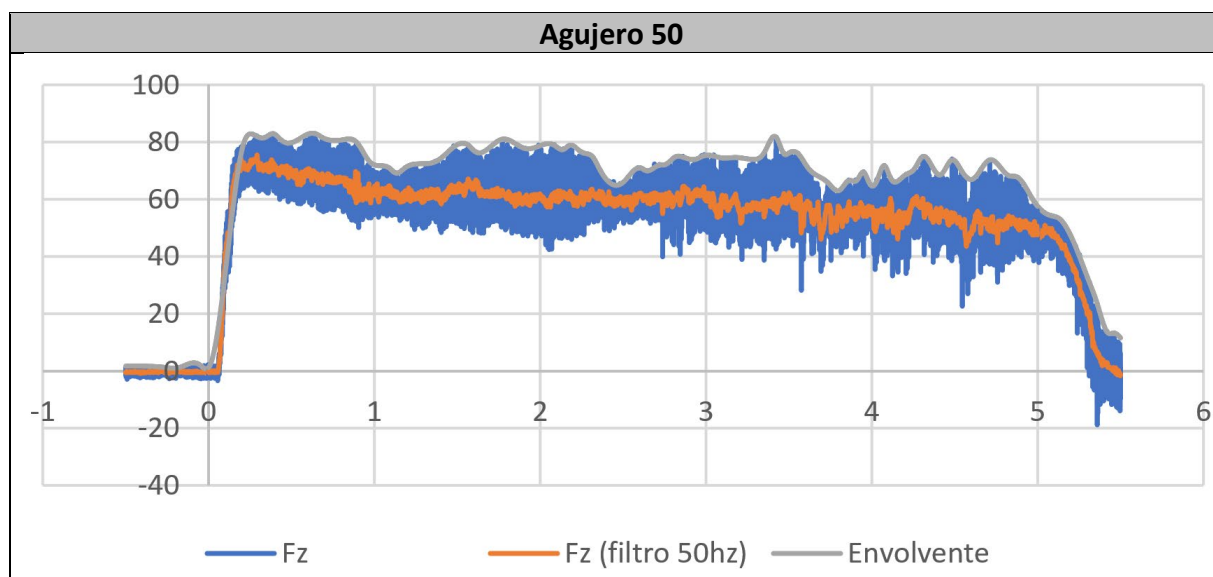
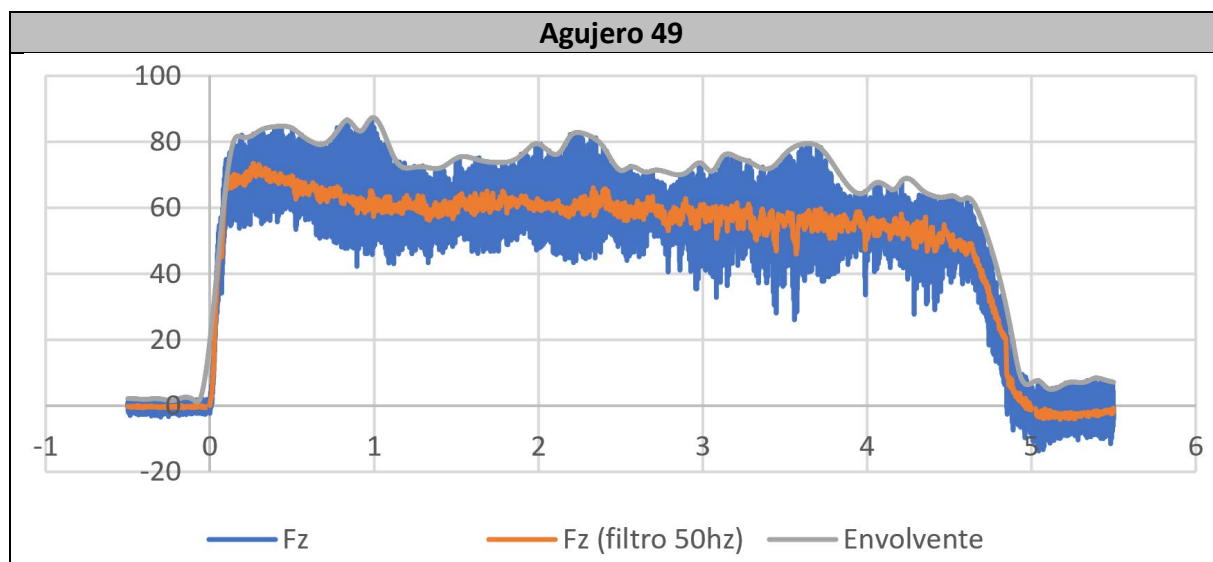
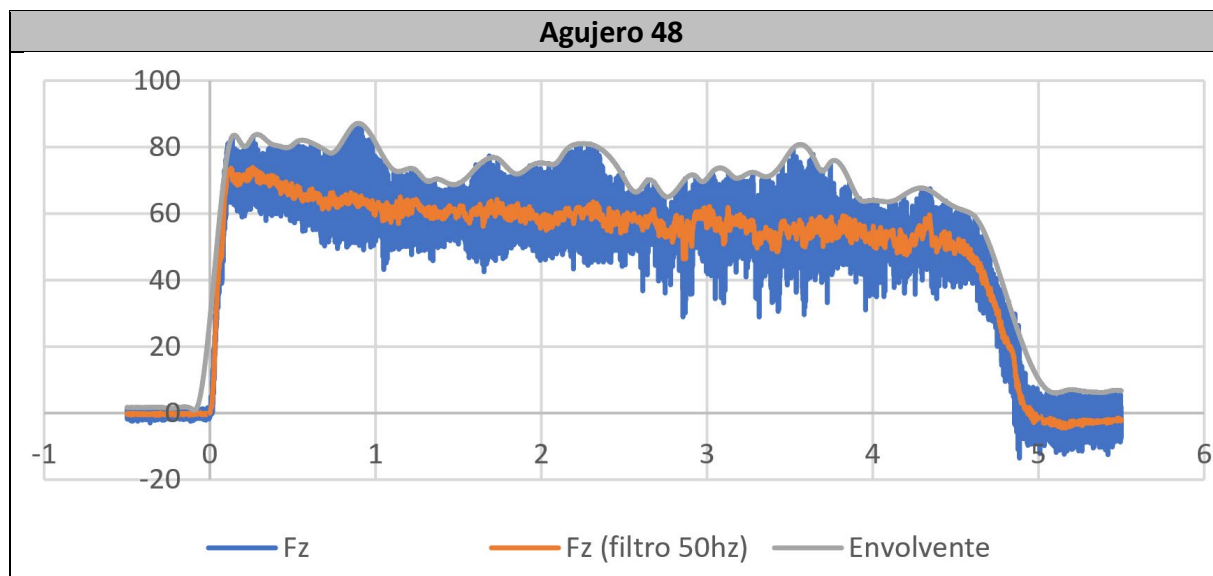


Agujero 46

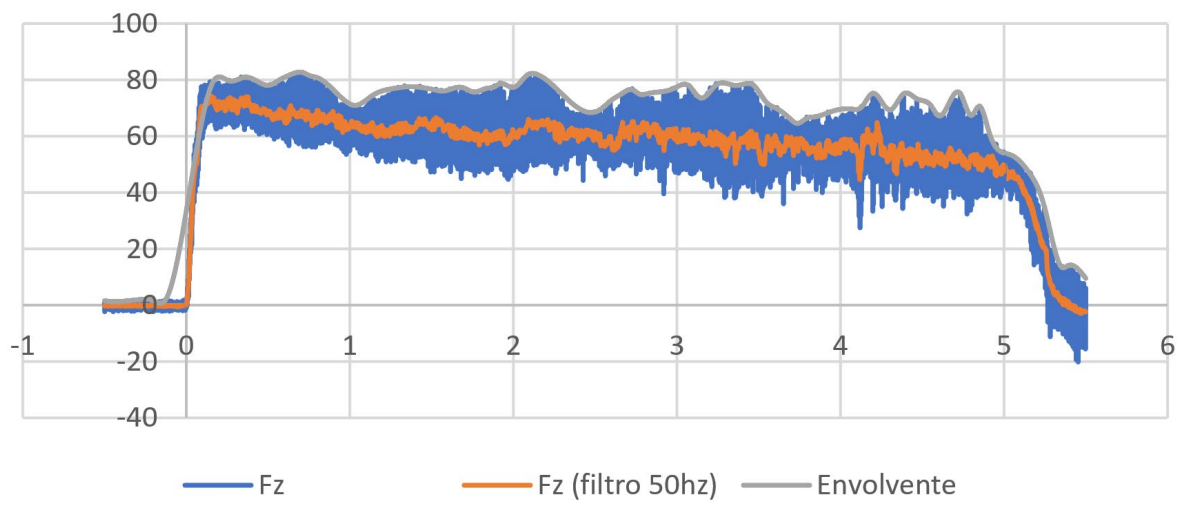


Agujero 47

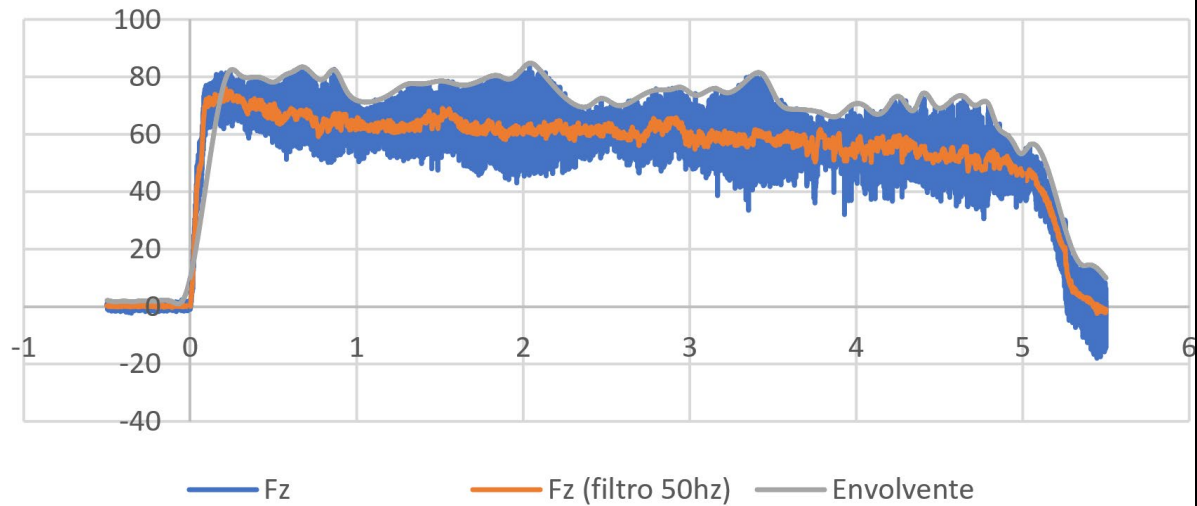




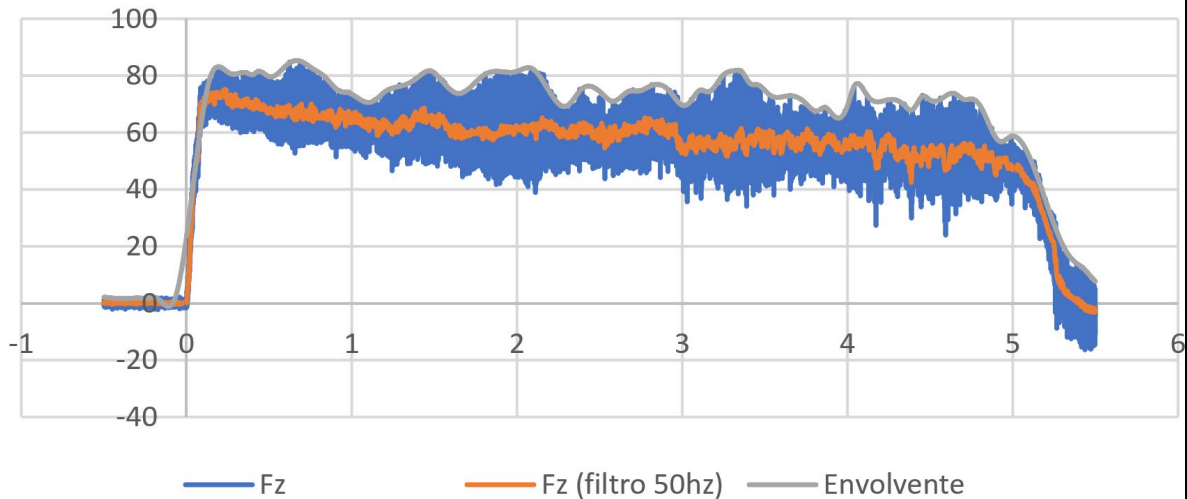
Agujero 51

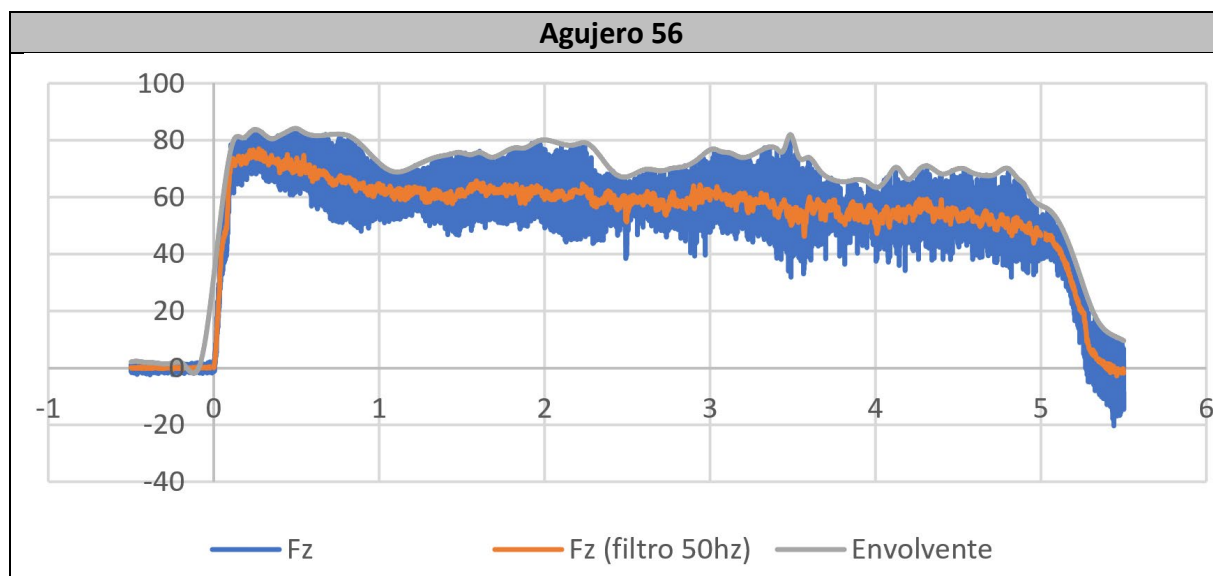
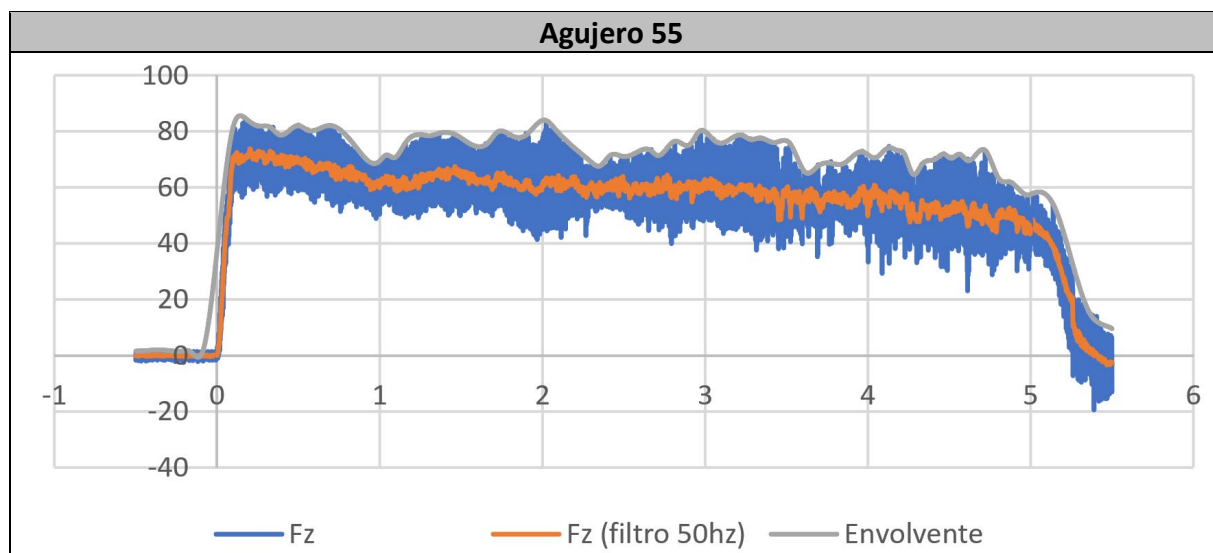
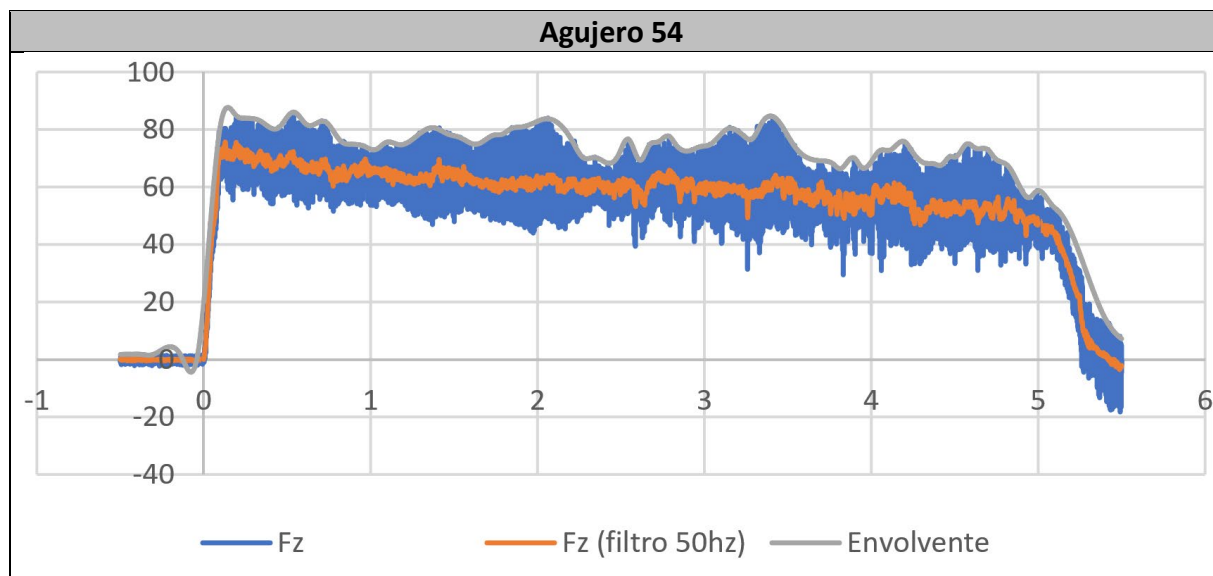


Agujero 52

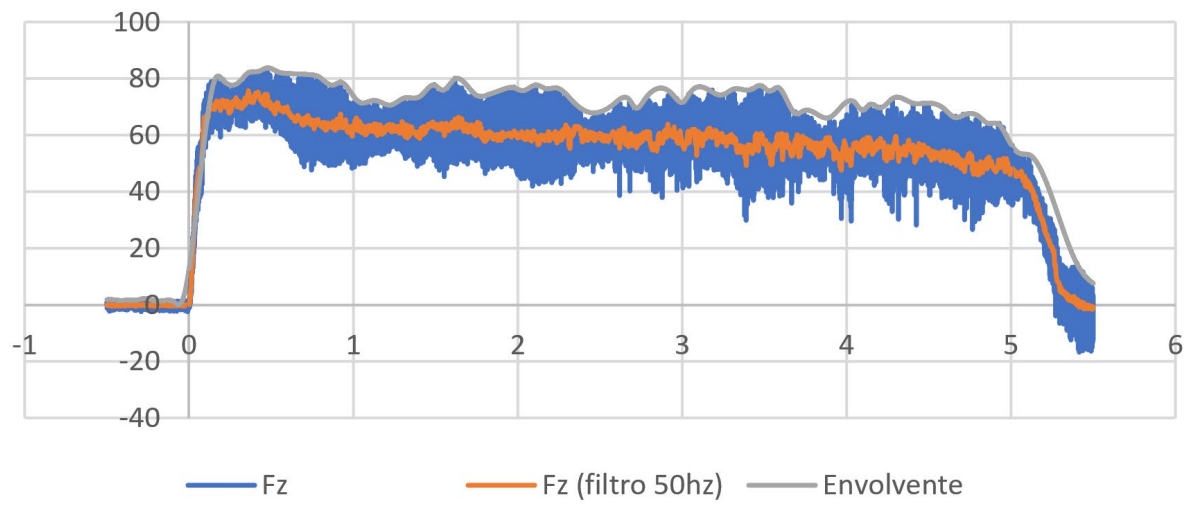


Agujero 53

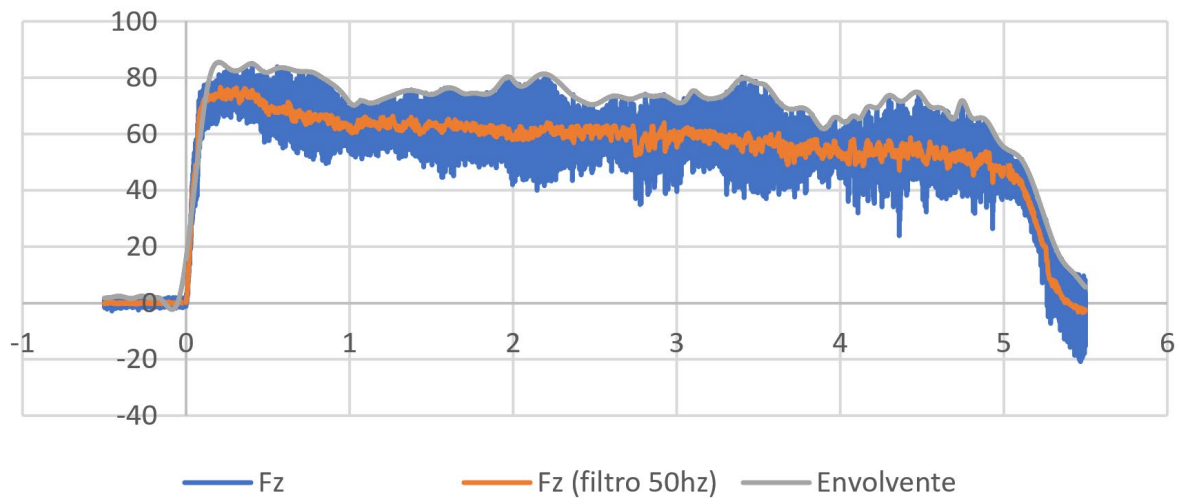




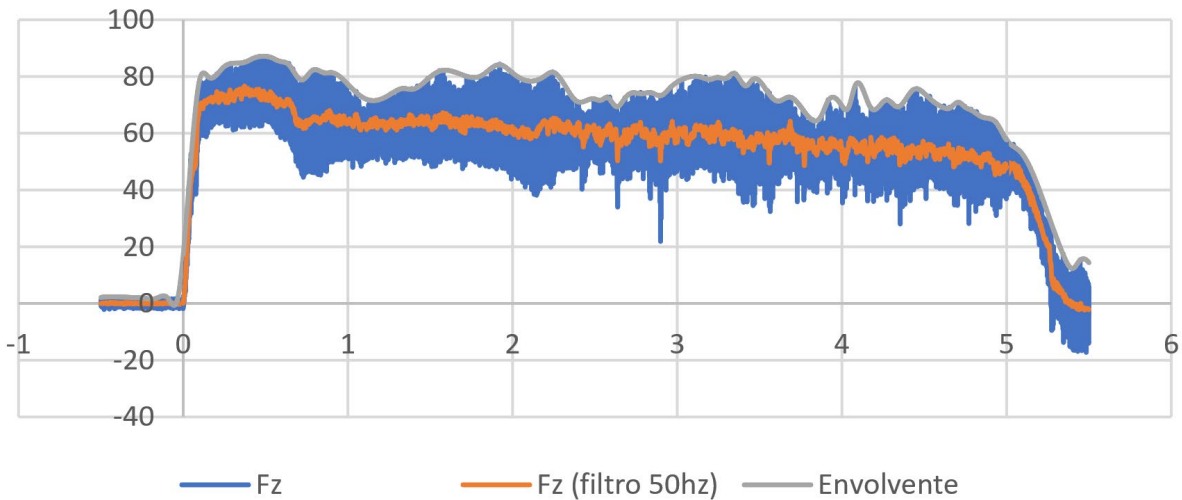
Agujero 57



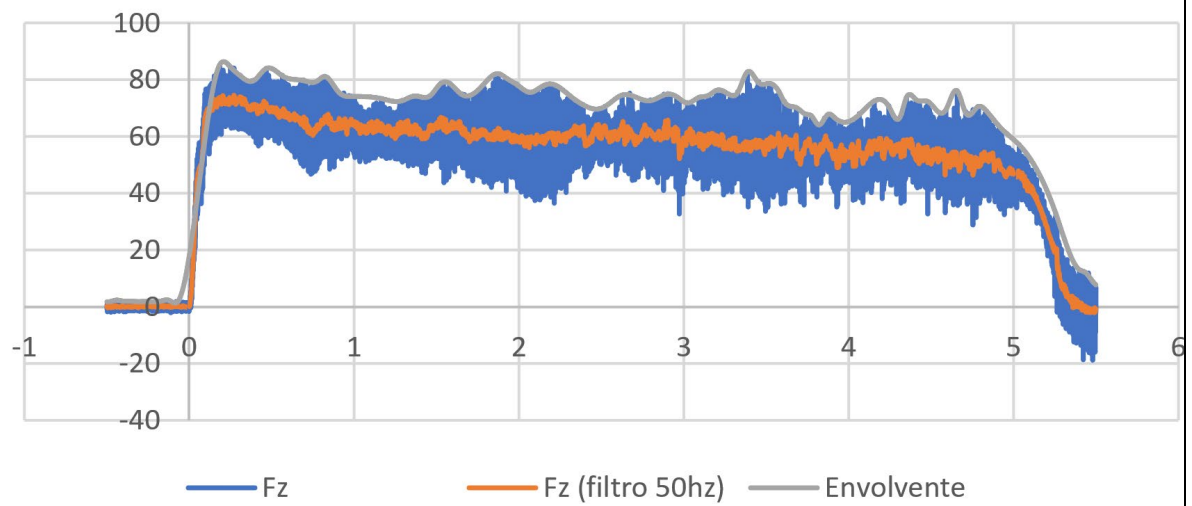
Agujero 58



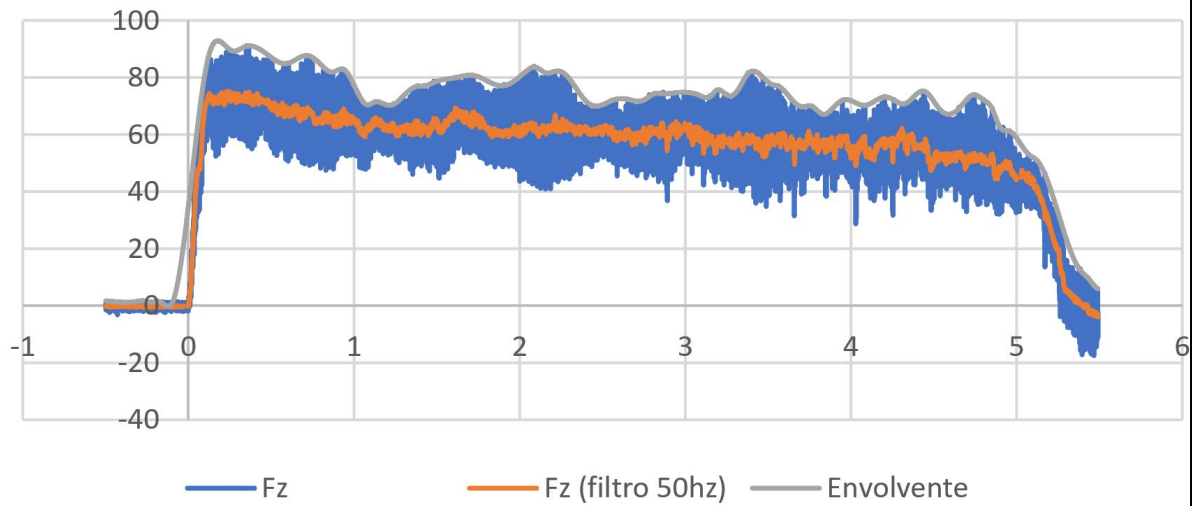
Agujero 59



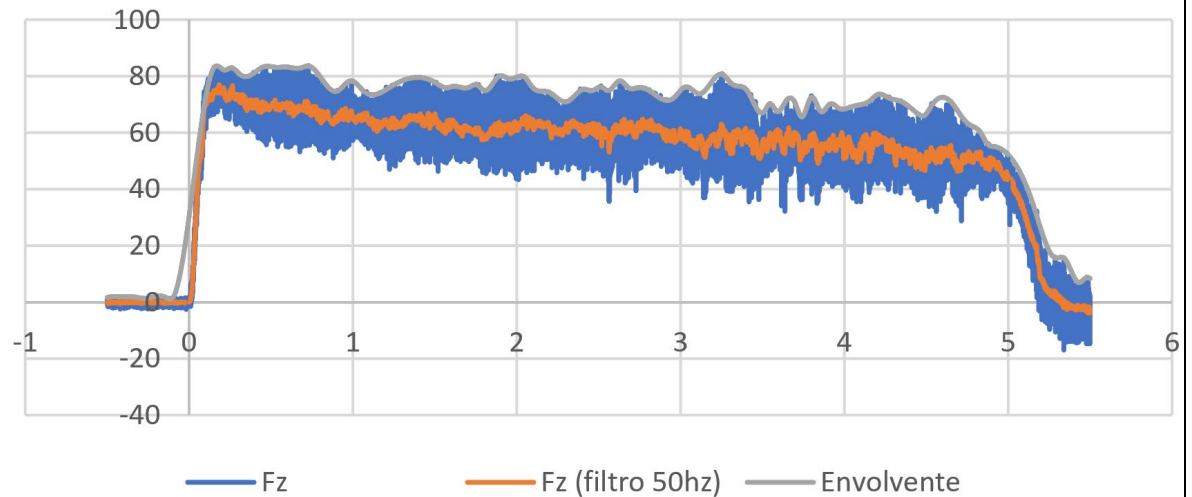
Agujero 60



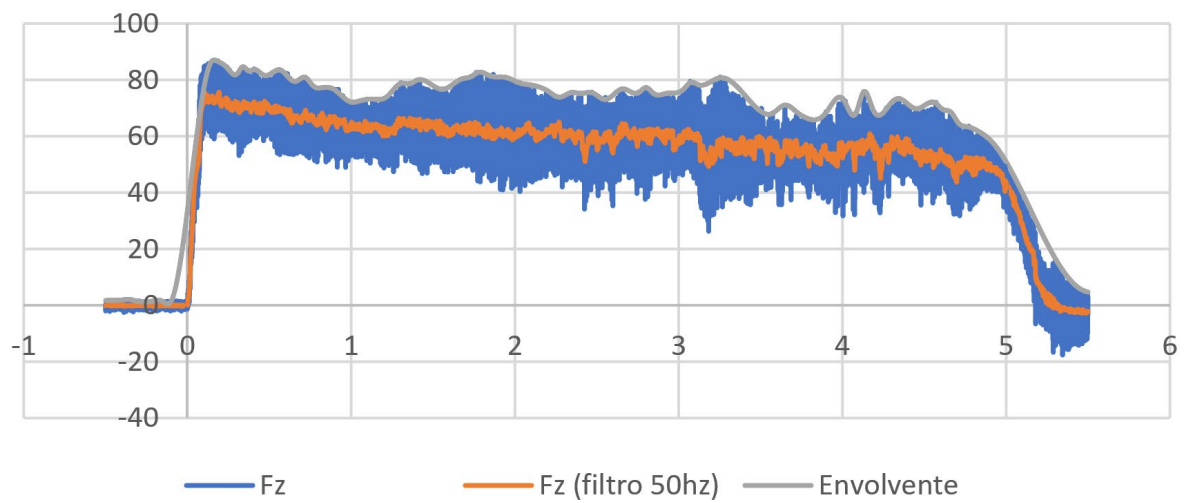
Agujero 61



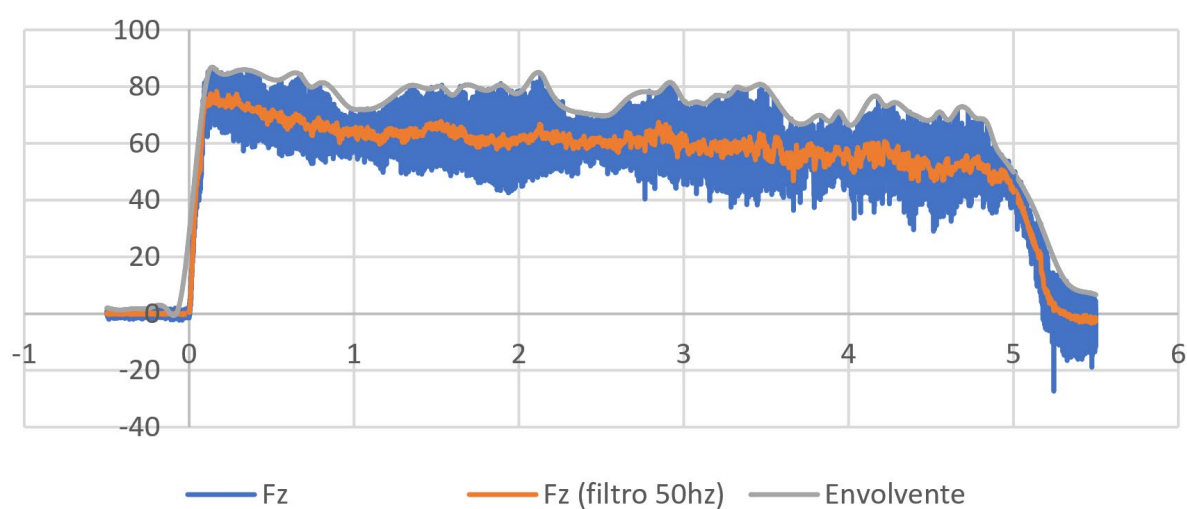
Agujero 62



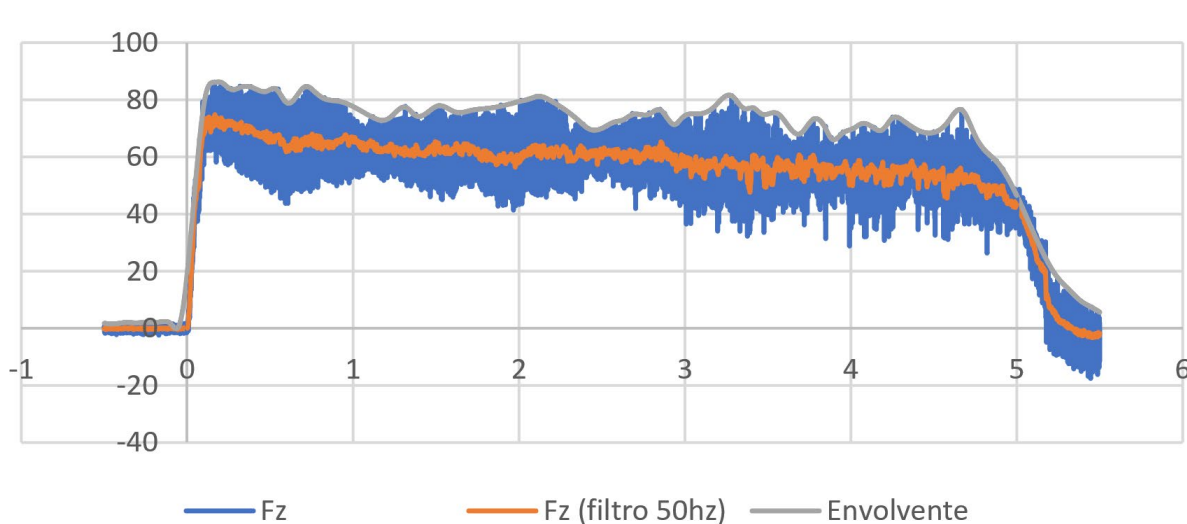
Agujero 63



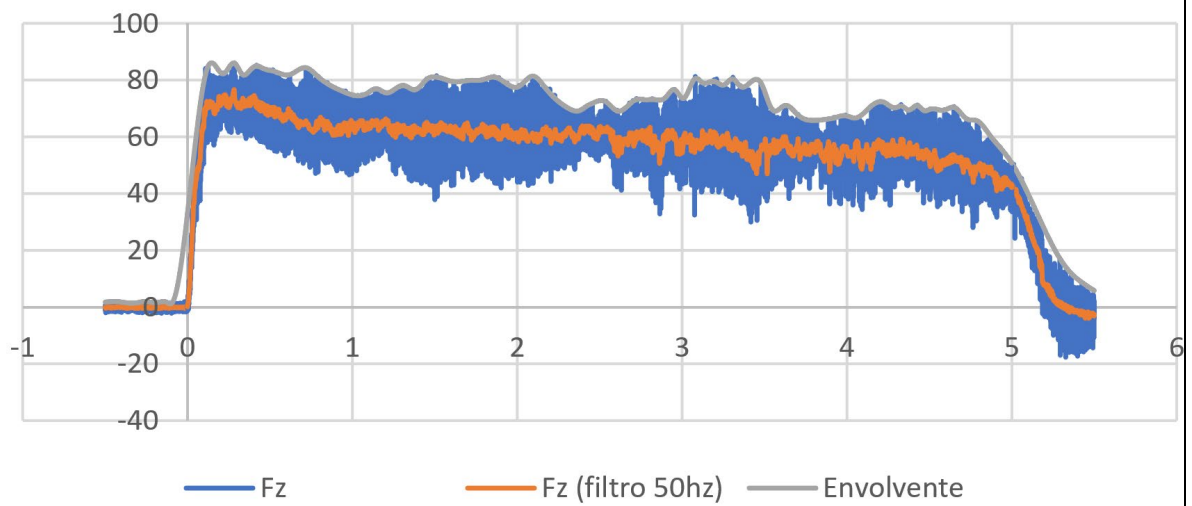
Agujero 64



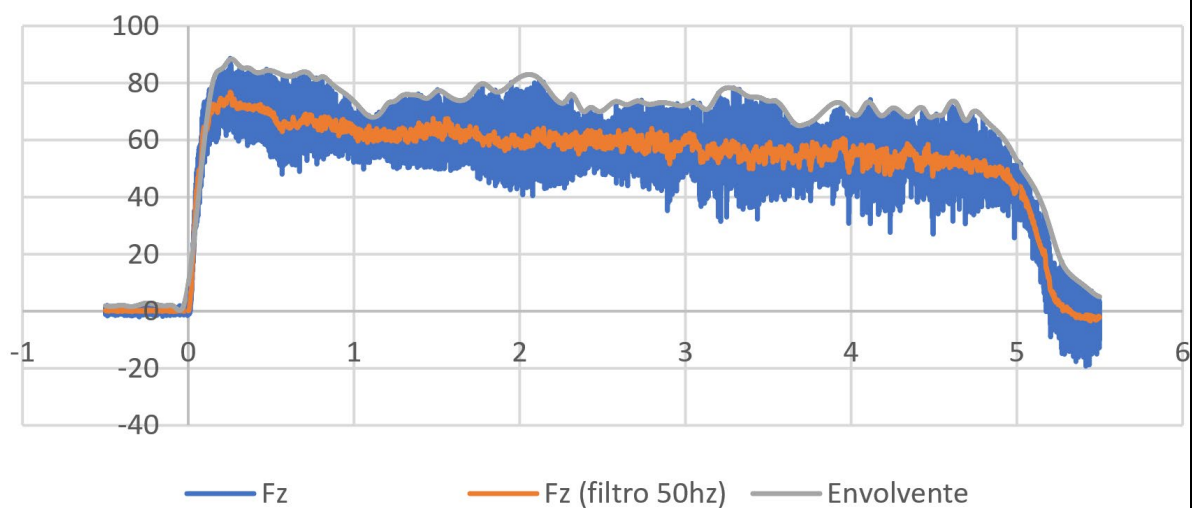
Agujero 65



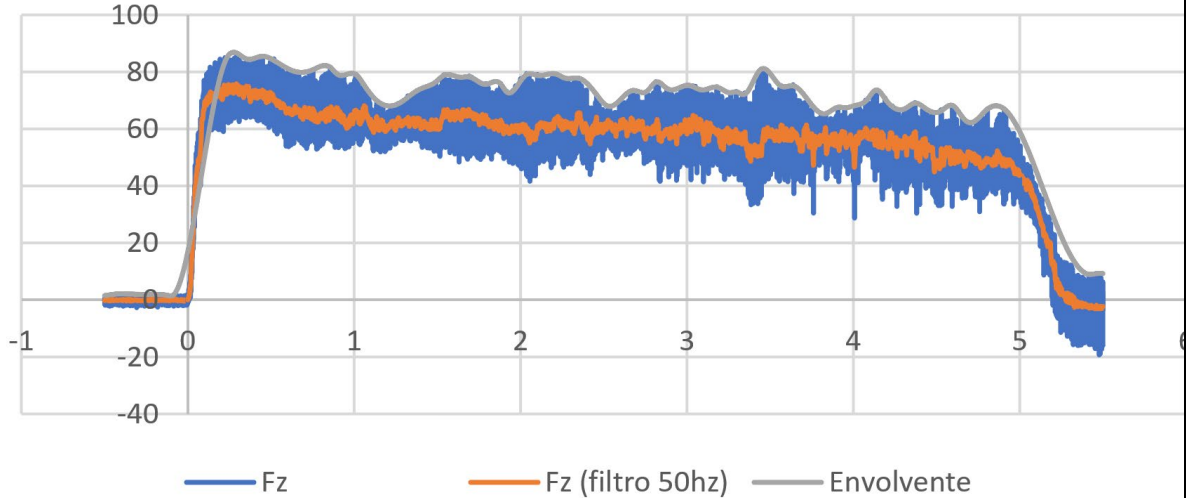
Agujero 66



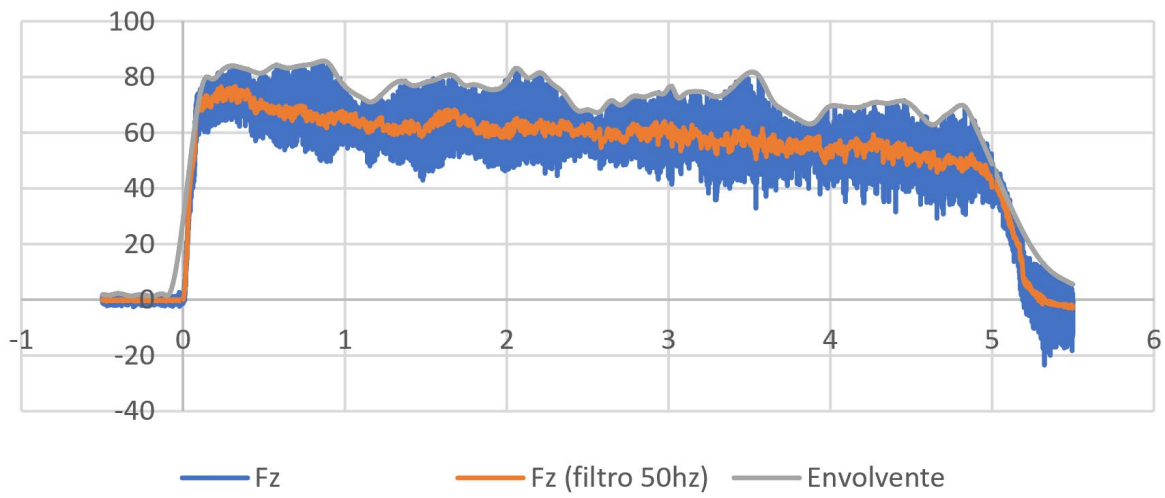
Agujero 67



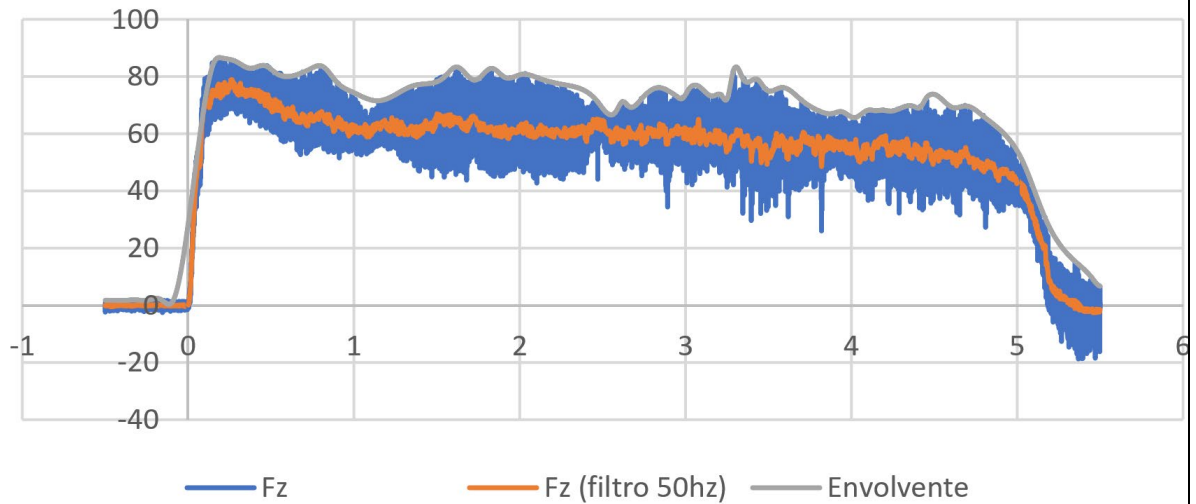
Agujero 68



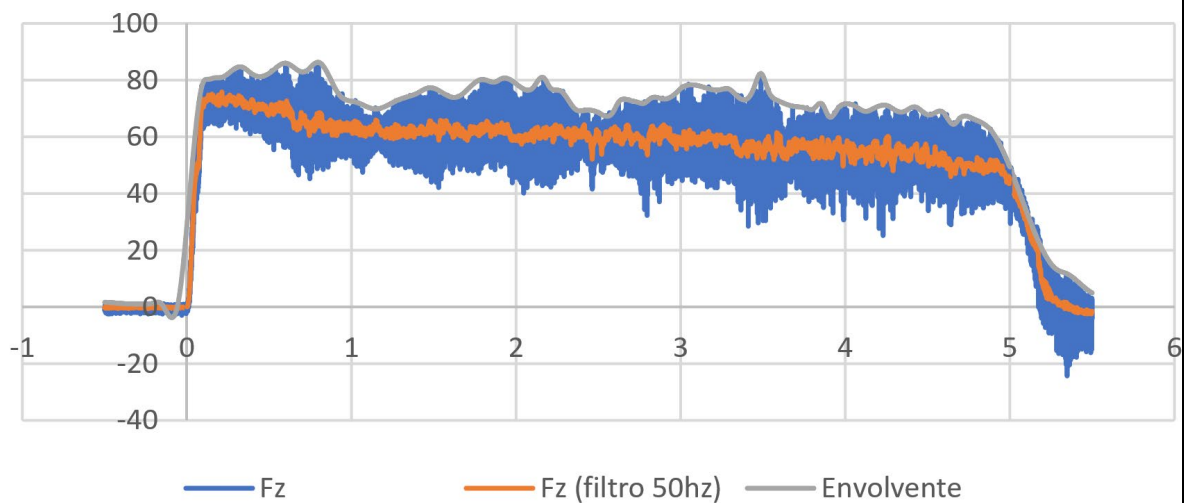
Agujero 69



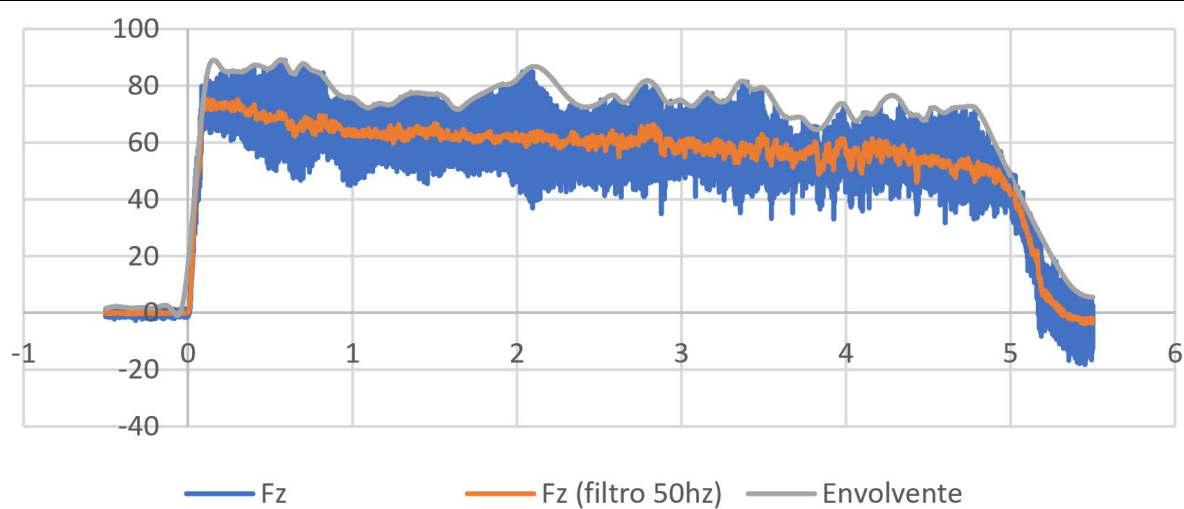
Agujero 70



Agujero 71



Agujero 72



C. Especificaciones de la herramienta

Fresa frontal 3 labios, corta - Corte al centro

3 flute slot drill, short - Center cut

Fraise cylindrique en bout, 3 dents, court - Coupe au centre

Fresa cilindrica frontali, 3 denti, corta - Taglio al centro

Langlochfräser, 3 Schneiden, kurz - Zentrumsschnitt

Фреза 3-х зубая концевая с торцовой режущей частью, короткая серия

HM
MG 10

DIN
6527K
NORM

SERIE
S

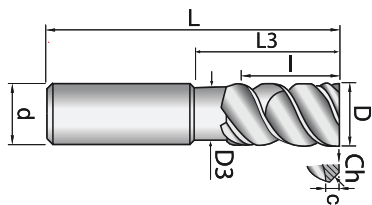
KENDU
TYP



HPC

42°±47°
HELIX

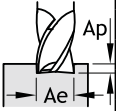
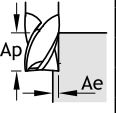
DIN
6535-HA



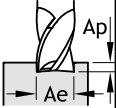
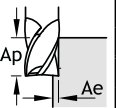
MQL

D	d	I	L	Z	D3	L3	c	Ch
f8	h6							45°
4	6	8	54	3	3,7	17	0,2	0,1
5	6	9	54	3	4,7	17	0,2	0,1
6	6	10	54	3	5,7	17	0,25	0,15
8	8	12	58	3	7,5	21	0,25	0,15
10	10	14	66	3	9,5	25	0,25	0,15
12	12	16	73	3	11,5	27	0,3	0,2
14	14	16	73	3	13	29	0,3	0,2
16	16	22	82	3	15	33	0,4	0,25
18	18	22	82	3	17	35	0,4	0,25
20	20	26	92	3	19	41	0,45	0,3

Recubrimiento - Coating - Revêtu - Rivestimento - Beschichtung - Покрытие	
K CROM +	K PRO
Aplicaciones - Application - Application - Anwendung - Applicazione - Применение	
P1	M3
K5 N8	S2 - S4
H1	
6302.67.	6302.62.
00400	00400
00500	00500
00600	00600
00800	00800
01000	01000
01200	01200
01400	01400
01600	01600
01800	01800
02000	02000

6302.67														
Ø = diámetro (mm) ... fz (mm) = F/(N*Z)														
Material	Ap	Ae	Vc (m/min)	Ø 4	Ø 5	Ø 6	Ø 8	Ø 10	Ø 12	Ø 14	Ø 16	Ø 18	Ø 20	
 P1 K5 N8 H1	101	1D - 0,5D	1D - 1D	200 - 210	0,017 0,021	0,022 0,027	0,027 0,034	0,041 0,047	0,051 0,059	0,059 0,068	0,067 0,076	0,074 0,085	0,081 0,093	0,089 0,102
	102			180 - 189	0,017 0,021	0,022 0,027	0,027 0,034	0,041 0,047	0,051 0,059	0,059 0,068	0,067 0,076	0,074 0,085	0,081 0,093	0,089 0,102
	103			170 - 179	0,015 0,019	0,020 0,024	0,024 0,031	0,037 0,042	0,046 0,053	0,053 0,061	0,060 0,068	0,067 0,077	0,073 0,084	0,080 0,092
	104			160 - 168	0,014 0,017	0,018 0,022	0,022 0,027	0,033 0,038	0,041 0,047	0,047 0,054	0,054 0,061	0,059 0,068	0,065 0,074	0,071 0,082
	105			150 - 158	0,013 0,016	0,017 0,020	0,020 0,026	0,031 0,035	0,038 0,044	0,044 0,051	0,050 0,057	0,056 0,064	0,061 0,070	0,067 0,077
	501			200 - 210	0,020 0,025	0,026 0,032	0,032 0,041	0,049 0,056	0,061 0,071	0,071 0,082	0,080 0,091	0,089 0,102	0,097 0,112	0,107 0,122
	502			180 - 189	0,020 0,024	0,025 0,031	0,031 0,039	0,047 0,054	0,059 0,068	0,068 0,078	0,077 0,087	0,085 0,098	0,093 0,107	0,102 0,117
	503			160 - 168	0,017 0,021	0,022 0,027	0,027 0,034	0,041 0,047	0,051 0,059	0,059 0,068	0,067 0,076	0,074 0,085	0,081 0,093	0,089 0,102
	504			200 - 210	0,020 0,025	0,026 0,032	0,032 0,041	0,049 0,056	0,061 0,071	0,071 0,082	0,080 0,091	0,089 0,102	0,097 0,112	0,107 0,122
	505			180 - 189	0,020 0,024	0,025 0,031	0,031 0,039	0,047 0,054	0,059 0,068	0,068 0,078	0,077 0,087	0,085 0,098	0,093 0,107	0,102 0,117
	506			160 - 168	0,017 0,021	0,022 0,027	0,027 0,034	0,041 0,047	0,051 0,059	0,059 0,068	0,067 0,076	0,074 0,085	0,081 0,093	0,089 0,102
	507			140 - 147	0,017 0,021	0,022 0,027	0,027 0,034	0,041 0,047	0,051 0,059	0,059 0,068	0,067 0,076	0,074 0,085	0,081 0,093	0,089 0,102
	803			77 - 89	0,015 0,024	0,019 0,031	0,023 0,038	0,036 0,054	0,045 0,066	0,051 0,077	0,058 0,086	0,064 0,096	0,071 0,105	0,078 0,116
	804			62 - 71	0,015 0,024	0,019 0,031	0,023 0,038	0,036 0,054	0,045 0,066	0,051 0,077	0,058 0,086	0,064 0,096	0,071 0,105	0,078 0,116
	106			120 - 126	0,013 0,016	0,017 0,020	0,020 0,026	0,031 0,035	0,038 0,044	0,044 0,051	0,050 0,057	0,056 0,064	0,061 0,070	0,067 0,077
 P1 K5 N8 H1	101	1,25D - 1,25D	0,4D - 0,02D	220 - 393	0,022 0,044	0,029 0,057	0,035 0,067	0,050 0,084	0,061 0,097	0,071 0,109	0,080 0,124	0,089 0,140	0,097 0,147	0,107 0,155
	102			198 - 354	0,022 0,044	0,029 0,057	0,035 0,067	0,050 0,084	0,061 0,097	0,071 0,109	0,080 0,124	0,089 0,140	0,097 0,147	0,107 0,155
	103			187 - 334	0,020 0,040	0,026 0,051	0,032 0,060	0,045 0,076	0,055 0,087	0,064 0,098	0,072 0,112	0,080 0,126	0,087 0,132	0,096 0,140
	104			176 - 314	0,018 0,035	0,023 0,046	0,028 0,054	0,040 0,067	0,049 0,078	0,057 0,087	0,064 0,099	0,071 0,112	0,078 0,118	0,086 0,124
	105			165 - 295	0,017 0,033	0,022 0,043	0,026 0,050	0,038 0,063	0,046 0,073	0,053 0,082	0,060 0,093	0,067 0,105	0,073 0,110	0,080 0,116
	501			220 - 393	0,026 0,053	0,035 0,068	0,042 0,080	0,060 0,101	0,073 0,116	0,085 0,131	0,096 0,149	0,107 0,168	0,116 0,176	0,128 0,186
	502			198 - 354	0,025 0,051	0,033 0,066	0,040 0,077	0,058 0,097	0,070 0,112	0,082 0,125	0,092 0,143	0,102 0,161	0,112 0,169	0,123 0,178
	503			176 - 314	0,022 0,044	0,029 0,057	0,035 0,067	0,050 0,084	0,061 0,097	0,071 0,109	0,080 0,124	0,089 0,140	0,097 0,147	0,107 0,155
	504			220 - 393	0,026 0,053	0,035 0,068	0,042 0,080	0,060 0,101	0,073 0,116	0,085 0,131	0,096 0,149	0,107 0,168	0,116 0,176	0,128 0,186
	505			198 - 354	0,025 0,051	0,033 0,066	0,040 0,077	0,058 0,097	0,070 0,112	0,082 0,125	0,092 0,143	0,102 0,161	0,112 0,169	0,123 0,178
	506			176 - 314	0,022 0,044	0,029 0,057	0,035 0,067	0,050 0,084	0,061 0,097	0,071 0,109	0,080 0,124	0,089 0,140	0,097 0,147	0,107 0,155
	507			154 - 275	0,022 0,044	0,029 0,057	0,035 0,067	0,050 0,084	0,061 0,097	0,071 0,109	0,080 0,124	0,089 0,140	0,097 0,147	0,107 0,155
	803			93 - 280	0,025 0,073	0,032 0,092	0,040 0,110	0,056 0,138	0,070 0,160	0,080 0,179	0,091 0,204	0,101 0,230	0,110 0,242	0,122 0,255
	804			74 - 224	0,025 0,073	0,032 0,092	0,040 0,110	0,056 0,138	0,070 0,160	0,080 0,179	0,091 0,204	0,101 0,230	0,110 0,242	0,122 0,255
	106			132 - 236	0,017 0,033	0,022 0,043	0,026 0,050	0,038 0,063	0,046 0,073	0,053 0,082	0,060 0,093	0,067 0,105	0,073 0,110	0,080 0,116



6302.62														
Ø = diámetro (mm) ... fz (mm) = F/(N*Z)														
Material	Ap	Ae	Vc (m/min)	Ø 4	Ø 5	Ø 6	Ø 8	Ø 10	Ø 12	Ø 14	Ø 16	Ø 18	Ø 20	
 M3 301 302 303 304 305 306 S2 201 202 203 S4 401 402 403	1D - 0,5D	1D - 1D	130 - 135	0,012 0,016	0,016 0,020	0,020 0,025	0,031 0,035	0,038 0,044	0,044 0,050	0,049 0,057	0,055 0,063	0,060 0,069	0,066 0,076	
			117 - 122	0,011 0,015	0,015 0,019	0,019 0,024	0,029 0,033	0,036 0,042	0,042 0,048	0,047 0,054	0,052 0,060	0,057 0,066	0,063 0,072	
			104 - 108	0,011 0,014	0,014 0,018	0,018 0,023	0,028 0,032	0,034 0,040	0,040 0,045	0,044 0,051	0,050 0,057	0,054 0,062	0,059 0,068	
			85 - 88	0,011 0,014	0,014 0,018	0,018 0,023	0,028 0,032	0,034 0,040	0,040 0,045	0,044 0,051	0,050 0,057	0,054 0,062	0,059 0,068	
			65 - 68	0,010 0,014	0,014 0,017	0,017 0,021	0,026 0,030	0,032 0,037	0,037 0,043	0,042 0,048	0,047 0,054	0,051 0,059	0,056 0,065	
			52 - 54	0,010 0,014	0,014 0,017	0,017 0,021	0,026 0,030	0,032 0,037	0,037 0,043	0,042 0,048	0,047 0,054	0,051 0,059	0,056 0,065	
			86 - 104	0,013 0,018	0,017 0,023	0,021 0,028	0,033 0,040	0,040 0,049	0,047 0,057	0,053 0,064	0,058 0,071	0,064 0,078	0,070 0,086	
			54 - 66	0,013 0,018	0,017 0,023	0,021 0,028	0,033 0,040	0,040 0,049	0,047 0,057	0,053 0,064	0,058 0,071	0,064 0,078	0,070 0,086	
			138 - 166	0,018 0,025	0,024 0,032	0,029 0,039	0,046 0,056	0,056 0,069	0,066 0,080	0,074 0,090	0,081 0,099	0,090 0,109	0,098 0,120	
			45 - 55	0,011 0,014	0,014 0,018	0,018 0,022	0,027 0,031	0,034 0,039	0,039 0,045	0,044 0,051	0,049 0,056	0,054 0,062	0,059 0,068	
			32 - 39	0,011 0,014	0,014 0,018	0,018 0,022	0,027 0,031	0,034 0,039	0,039 0,045	0,044 0,051	0,049 0,056	0,054 0,062	0,059 0,068	
			23 - 28	0,011 0,014	0,014 0,018	0,018 0,022	0,027 0,031	0,034 0,039	0,039 0,045	0,044 0,051	0,049 0,056	0,054 0,062	0,059 0,068	
 M3 301 302 303 304 305 306 S2 201 202 203 S4 401 402 403	1,25D - 1,25D	0,4D - 0,02D	140 - 264	0,017 0,045	0,021 0,057	0,026 0,068	0,037 0,085	0,046 0,099	0,052 0,110	0,059 0,126	0,066 0,142	0,072 0,150	0,080 0,158	
			126 - 238	0,016 0,043	0,020 0,054	0,025 0,065	0,035 0,081	0,044 0,094	0,049 0,105	0,056 0,120	0,063 0,135	0,068 0,143	0,076 0,150	
			112 - 211	0,015 0,041	0,019 0,051	0,023 0,061	0,033 0,077	0,041 0,089	0,047 0,099	0,053 0,113	0,059 0,128	0,065 0,135	0,072 0,142	
			91 - 172	0,015 0,041	0,019 0,051	0,023 0,061	0,033 0,077	0,041 0,089	0,047 0,099	0,053 0,113	0,059 0,128	0,065 0,135	0,072 0,142	
			70 - 132	0,014 0,038	0,018 0,048	0,022 0,058	0,031 0,072	0,039 0,084	0,044 0,094	0,050 0,107	0,056 0,121	0,061 0,128	0,068 0,134	
			56 - 106	0,014 0,038	0,018 0,048	0,022 0,058	0,031 0,072	0,039 0,084	0,044 0,094	0,050 0,107	0,056 0,121	0,061 0,128	0,068 0,134	
			109 - 236	0,019 0,047	0,024 0,059	0,029 0,072	0,041 0,089	0,051 0,103	0,059 0,115	0,067 0,132	0,074 0,148	0,082 0,157	0,090 0,165	
			69 - 149	0,019 0,047	0,024 0,059	0,029 0,072	0,041 0,089	0,051 0,103	0,059 0,115	0,067 0,132	0,074 0,148	0,082 0,157	0,090 0,165	
			174 - 378	0,027 0,066	0,034 0,083	0,041 0,101	0,057 0,125	0,071 0,144	0,083 0,161	0,094 0,185	0,104 0,207	0,115 0,220	0,126 0,231	
			57 - 185	0,015 0,029	0,019 0,037	0,023 0,044	0,033 0,055	0,041 0,064	0,047 0,072	0,053 0,082	0,059 0,092	0,065 0,097	0,071 0,103	
			40 - 130	0,015 0,029	0,019 0,037	0,023 0,044	0,033 0,055	0,041 0,064	0,047 0,072	0,053 0,082	0,059 0,092	0,065 0,097	0,071 0,103	
			29 - 93	0,015 0,029	0,019 0,037	0,023 0,044	0,033 0,055	0,041 0,064	0,047 0,072	0,053 0,082	0,059 0,092	0,065 0,097	0,071 0,103	